



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

(11) PI 0902474-3 B1



(22) Data do Depósito: 28/07/2009

(45) Data de Concessão: 03/09/2019

(54) Título: MÉTODO PARA COMBINAR SINAIS DE PRESSÃO E DE VELOCIDADE VERTICAL DE PARTÍCULA EM CABOS SÍSMICOS REBOCÁVEIS DE DUPLO SENSOR

(51) Int.Cl.: G01V 1/38.

(30) Prioridade Unionista: 01/08/2008 US 12/221,255.

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

(72) Inventor(es): FREDERICK JAMES BARR JR..

(57) Resumo: MÉTODO PARA SOMAR SINAIS DE CABO SÍSMICO REBOCÁVEL COM DUPLO SENSOR UTILIZANDO VELOCIDADES DE REFLEXÃO SÍSMICA. A presente invenção refere-se a um sinal de velocidade de partícula combinado que é gerado pela combinação de um sinal de velocidade vertical de partícula gravado, dimensionado em uma faixa de frequências superiores utilizando um ângulo de chegada dependente do tempo como determinado pela análise de velocidade, com um sinal de velocidade de partícula simulado, calculado em uma faixa de frequências inferiores a partir de um sinal de pressão gravado utilizando um filtro de variação de tempo baseado no tempo de chegada dependente do tempo. Sinais combinados de pressão e de velocidade vertical de partícula são gerados pela combinação dos sinais de pressão gravado e de velocidade combinado.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODO PARA COMBINAR SINAIS DE PRESSÃO E DE VELOCIDADE VERTICAL DE PARTÍCULA EM CABOS SÍSMICOS REBOCÁVEIS DE DUPLO SENSOR**".

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

Campo da Invenção

[001] A presente invenção refere-se de modo geral ao campo de prospecção geofísica. Mais particularmente, a invenção refere-se ao campo de atenuação de ruído em dados sísmicos marítimos de cabo sísmico rebocável com duplo sensor.

Descrição da Técnica Relacionada

[002] Na indústria de óleo e gás, a prospecção geofísica é normalmente utilizada para auxiliar na pesquisa e na avaliação de formações subterrâneas. As técnicas de prospecção geofísicas produzem conhecimento sobre a estrutura subsuperfície da terra, o que é útil para encontrar e extrair recursos minerais valiosos, particularmente, depósitos de hidrocarboneto, tal como óleo e gás natural. Uma técnica bem conhecida de prospecção geofísica é um levantamento sísmico. Em um levantamento sísmico terrestre, um sinal sísmico é gerado próximo ou na superfície da terra e então percorre para a subsuperfície da terra. No levantamento sísmico marítimo, o sinal sísmico também pode percorrer para baixo através de um volume de água sobrepondo a superfície abaixo da terra. As fontes de energia sísmica são utilizadas para gerar o sinal sísmico, o qual, após propagar para dentro da terra, é pelo menos parcialmente refletido pelos refletores sísmicos de subsuperfície. Tais refletores sísmicos tipicamente são interfaces entre formações subterrâneas possuindo diferentes propriedades elásticas, especificamente a velocidade da onda do som e a densidade da rocha, as quais levam a diferenças na impedância acústica nas interfaces. A energia sísmica refletida é detectada pelos sensores sísmicos (tam-

bém chamados de receptores sísmicos) próximos ou na superfície da terra, em um volume de água sobreposto, ou em profundidades conhecidas em furos de sonda, e gravados.

[003] Os dados sísmicos resultantes obtidos ao se executar o levantamento sísmico são processados para produzir informação se relacionando com a estrutura geológica e com as propriedades das formações subterrâneas na área sendo inspecionada. Os dados sísmicos processados são processados para exibição e análise de conteúdo potencial de hidrocarbonetos destas formações subterrâneas. O objetivo do processamento dos dados sísmicos é extrair a partir dos dados sísmicos o máximo de informações possíveis com respeito às formações subterrâneas de modo a adequadamente formar uma imagem da subsuperfície geológica. De modo a identificar localizações de subsuperfície da terra onde existe uma probabilidade de encontrar acumulação de petróleo, grandes somas de dinheiro são gastas em coletar, processar e interpretar dados sísmicos. O processo de construir as superfícies refletoras definindo as camadas terrestres subterrâneas de interesse a partir dos dados sísmicos gravados proporciona uma imagem da terra em profundidade ou no tempo.

[004] A imagem da estrutura da subsuperfície da terra é produzida de modo a permitir a um intérprete selecionar localizações com maior probabilidade de possuir acumulações de petróleo. Para verificar a presença de petróleo, um poço deve ser perfurado. Perfurar poços para determinar se os depósitos de petróleo estão presentes ou não é um empreendimento extremamente oneroso e demorado. Por esta razão, existe uma necessidade contínua de aperfeiçoar o processamento e a exibição de dados sísmicos, de modo a produzir uma imagem da estrutura da subsuperfície da terra que irá aperfeiçoar a habilidade de um intérprete, seja a interpretação feita por um computador ou por um humano, de avaliar a probabilidade de que uma acumulação de

petróleo existe em uma localização particular na subsuperfície da terra.

[005] As fontes sísmicas apropriadas para gerar o sinal sísmico nos levantamentos sísmicos terrestres podem incluir explosivos ou vibradores. Os levantamentos sísmicos marítimos normalmente empregam uma fonte sísmica submersa rebocada por um navio e periodicamente ativada para gerar um campo de onda acústica. A fonte sísmica gerando o campo de onda pode ser de vários tipos, incluindo uma pequena carga de explosivos, uma centelha ou arco elétrico, um vibrador marítimo, e, tipicamente, um canhão. O canhão de fonte sísmica pode ser um canhão de água, um canhão de vapor e, mais frequentemente, um canhão de ar. Uma fonte sísmica marítima normalmente consiste não somente de um único elemento de fonte, mas de uma série espacialmente distribuída de elementos de fonte. Esta disposição é particularmente verdadeira para canhões de ar, atualmente a forma mais comum de fonte sísmica marítima. Em uma série de canhões de ar, cada canhão de ar armazena e rapidamente libera um volume diferente de ar altamente comprimido, formando um impulso de curta duração.

[006] Os tipos apropriados de sensores sísmicos incluem sensores de velocidade de partícula, particularmente em levantamentos terrestres, e sensores de pressão de água, particularmente em levantamentos marítimos. Algumas vezes, sensores de deslocamento de partícula, sensores de aceleração de partícula, ou sensores de gradiente de pressão são utilizados em vez de ou em adição aos sensores de velocidade de partícula. Os sensores de velocidade de partícula e os sensores de pressão de água são normalmente conhecidos na técnica como geofones e hidrofones, respectivamente. Os sensores sísmicos podem ser empregados sozinhos, mas são mais normalmente empregados em séries de sensores. Adicionalmente, os sensores de pressão e os sensores de velocidade de partícula podem ser empregados

juntos em um levantamento marítimo, colocados em pares ou em pares de séries.

[007] Em um levantamento sísmico marítimo convencional, um navio de levantamento sísmico percorre a superfície da água, tipicamente a 9,26 km/h (5 nós), e contém equipamentos sísmicos de aquisição, tal como controle de navegação, controle de fonte sísmica, controle de sensor sísmico, e equipamento de gravação. O equipamento de controle de fonte sísmica faz com que uma fonte sísmica rebocada no volume de água pelo navio sísmico atue em tempos selecionados. Os cabos sísmicos rebocáveis, também chamados de cabos sísmicos, são estruturas alongadas do tipo cabo rebocadas no volume de água pelo navio de levantamento sísmico que reboca a fonte sísmica ou por outro navio de levantamento sísmico. Normalmente, vários cabos sísmicos são rebocáveis atrás de uma embarcação sísmica.

[008] Quando a série de canhões de ar é disparada, uma onda de impulso de som percorre para baixo através da água e para dentro da terra. Em cada interface onde o tipo de rocha se altera, uma parte desta onda de som é refletida de volta em direção à superfície e de volta para dentro da camada de água. Após a onda refletida alcançar o cabo sísmico, a onda continua a se propagar até a interface de água/ar na superfície da água, a partir da onde a onda é refletida para baixo, e é novamente detectada pelos hidrofones no cabo sísmico rebocável. A superfície da água é um bom refletor e o coeficiente de reflexão na superfície da água é quase unitário em magnitude e é negativo em sinal para ondas de pressão. As ondas de pressão refletidas na superfície serão assim trocadas de fase em 180 graus em relação às ondas de propagação para cima. A onda de propagação para baixo gravada pelos receptores normalmente é referida como a reflexão de superfície ou sinal "fantasma". Devido à reflexão de superfície, a superfície da água atua como um filtro, o que cria recortes espectrais no

sinal gravado, tornando difícil gravar dados fora de uma largura de banda selecionada. Devido à influência da reflexão de superfície, algumas frequências no sinal gravado são amplificadas e algumas frequências são atenuadas.

[009] A atenuação máxima da onda de pressão ocorre em frequências para as quais a distância de propagação entre o hidrofone de detecção e a superfície da água é igual a metade do comprimento de onda. A amplificação máxima ocorre em frequências para as quais a distância de propagação entre o hidrofone de detecção e a superfície da água é um quarto do comprimento de onda. O comprimento de onda da onda acústica é igual à velocidade dividida pela frequência, e a velocidade de uma onda acústica na água é cerca de 1500 metros/segundo. Por consequência, a localização no espectro de frequências do recorte espectral resultante é prontamente determinável. Por exemplo, para um cabo sísmico rebocável em uma profundidade de 7 metros, e ondas com incidência vertical, a atenuação máxima ocorre em uma frequência de cerca de 107 Hz e a amplificação máxima ocorre em uma frequência de cerca de 54 Hz.

[0010] Um sensor de movimento de partícula, tal como um geofone, possui sensibilidade direcional, ao passo que um sensor de pressão, tal como um hidrofone, não possui. Por consequência, os sinais de campo de onda subindo detectados por um geofone e por um hidrofone localizados próximos estará em fase, enquanto os sinais de onda descendo serão gravados 180 graus fora de fase. Várias técnicas têm sido propostas para utilizar esta diferença de fase para reduzir os cortes espectrais causados pela reflexão de superfície e, se as gravações forem feitas em um leito do mar, para atenuar múltiplos transportados por água. Deve ser observado que uma alternativa a ter o geofone e o hidrofone localizados juntos, é ter densidade espacial suficiente dos sensores de modo que os respectivos campos de onda gra-

vados pelo hidrofone e pelo geofone possam ser interpolados ou extrapolados para produzir os dois campos de onda na mesma localização.

[0011] É bem conhecido na técnica que os sinais de pressão e de movimento de partícula podem ser combinados para derivar ambos os campos de onda subindo e descendo. Para gravações no leito do mar, os campos de onda subindo e descendo podem ser subsequentemente combinados para remover o efeito da reflexão de superfície e para atenuar os múltiplos transportados pela água no sinal sísmico. Entretanto, para aplicações de cabo sísmico rebocável, o sinal de movimento de partícula tem sido considerado como possuindo utilidade limitada devido ao alto nível de ruído no sinal de movimento de partícula. Entretanto, se os sinais de movimento de partícula pudessem ser proporcionados para aquisições de cabo sísmico rebocável, o efeito dos "fantasmas" da reflexão de superfície poderiam ser removidos dos dados.

[0012] Tem sido difícil obter a mesma largura de banda nos dados do sensor de movimento como nos dados do sensor de pressão, entretanto, devido ao ruído induzido pelas vibrações no cabo sísmico rebocável, o qual é percebido pelos sensores de movimento de partícula. Entretanto, o ruído é principalmente confinado nas frequências mais baixas. Um modo de reduzir o ruído é ter vários sensores, próximos entre si, e conectados em série ou em paralelo. Esta abordagem, entretanto, nem sempre reduz o ruído o bastante para produzir uma relação de sinal-ruído, satisfatória para processamento sísmico adicional.

[0013] A aquisição sísmica marítima 3D convencional pelo cabo sísmico rebocável normalmente resulta em amostragem espacial assimétrica e dobra entre as direções alinhada e transversal. A densidade de amostragem é mais densa na direção alinhada (paralela aos cabos sísmicos rebocáveis) do que na direção transversal (perpendicular aos cabos sísmicos rebocáveis). A assimetria é devido a um espaça-

mento mais amplo entre os receptores em cabos sísmicos rebocáveis separados do que entre receptores no mesmo cabo sísmico rebocável. Esta assimetria pode levar à descontinuidade dos dados amostrados na direção transversal. A descontinuidade interfere com os esforços de combinar os sinais de pressão e de movimento de partícula para derivar os campos de onda subindo e descendo.

[0014] Assim, existe uma necessidade por um método para atenuar o ruído de baixa frequência encontrado nos sinais de sensor de velocidade vertical de partícula quando combinando os sinais do sensor de pressão e do sensor de velocidade vertical de partícula em dados de cabo sísmico rebocável com duplo sensor que manipule a descontinuidade alinhada e transversal por considerar os ângulos de incidência não-verticais, também conhecidos como ângulos de chegada.

BREVE SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0015] A invenção é um método para atenuar ruído de baixa frequência em sinais de cabo sísmico rebocável de sensor duplo por combinar sinais de pressão com sinais de velocidade vertical de partícula. Um sinal de velocidade de partícula combinado é gerado pela combinação de um sinal de velocidade vertical de partícula gravado, dimensionado em uma faixa de frequência superior utilizando um ângulo de chegada dependente do tempo como determinado pela análise de velocidade, com um sinal de velocidade de partícula simulado, calculado em uma faixa de frequência inferior a partir de um sinal de pressão gravado utilizando um filtro de variação de tempo baseado no tempo de chegada dependente do tempo. Os sinais de pressão e de velocidade vertical de partícula combinados são gerados pela combinação dos sinais de pressão e de velocidade de partícula combinado gravados.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0016] A invenção e suas vantagens podem ser mais facilmente

entendidas por referência à descrição detalhada seguinte e aos desenhos anexos, nos quais:

[0017] A Figura 1 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para combinar sinais de pressão e sinais de velocidade vertical de partícula em cabos sísmicos rebocáveis de duplo sensor;

[0018] a Figura 2 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para combinar um sinal de velocidade vertical de partícula dimensionado em uma faixa de frequência superior com um sinal de velocidade de partícula, calculado a partir de um sinal de pressão gravado em uma faixa de frequência inferior, para um conjunto de ângulos de chegada;

[0019] a Figura 3 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para combinar um sinal de pressão gravado com o sinal de velocidade de partícula dimensionado e combinado a partir da Figura 2, correspondendo a um ângulo de chegada determinado a partir da análise de velocidade;

[0020] a Figura 4 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar ângulos de chegada para diferentes tipos de inclinação geológica;

[0021] a Figura 5 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar ângulos de chegada para inclinação geológica menor do que 10° ;

[0022] a Figura 6 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar um ângulo de chegada para inclinação geológica maior do que 10° ;

[0023] a Figura 7 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar um ângulo de chegada para inclinações geológicas perpendiculares á linha da fonte para receptor;

[0024] a Figura 8 é um gráfico do ângulo de chegada vertical em função do tempo de gravação, $\phi(t)$;

[0025] a Figura 9 é uma seção de traços sintéticos de pressão e de velocidade vertical de partícula;

[0026] a Figura 10 é uma seção de traços sintéticos apresentados na Figura 9 revelados até 3,0 segundos;

[0027] a Figura 11 é uma vista plana de uma geometria de disparo utilizada na aquisição de dados marítimos com azimute amplo;

[0028] a Figura 12 é um gráfico de tempos de chegada de cinco eventos de reflexão através de 32 traços com deslocamento crescente;

[0029] a Figura 13 é uma primeira vista lateral esquemática de uma onda de som no ângulo de chegada;

[0030] a Figura 14 é uma segunda vista lateral esquemática de uma onda de som em um ângulo de chegada;

[0031] a Figura 15 é um gráfico de tempos de chegada para o segundo evento de reflexão na Figura 12; e

[0032] a Figura 16 é uma vista lateral esquemática de um refletor com uma inclinação perpendicular á linha a partir da fonte até o receptor.

[0033] Enquanto a invenção será descrita em conexão com suas concretizações preferidas, será entendido que a invenção não está limitada às mesmas. Ao contrário, é pretendido que a invenção cubra todas as alternativas, modificações e equivalentes que possam estar incluídos dentro do escopo da invenção, como definido pelas reivindicações anexas.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[0034] Um cabo sísmico rebocável com duplo sensor grava o campo de ondas sísmicas utilizando ambos os sensores de pressão e de velocidade vertical de partícula, permitindo uma decomposição subsequente do campo de ondas total em componentes de subida e de descida. O erro na estimativa deste componentes é aumentado pe-

lo ruído em ambos os sensores, mas o ruído tipicamente é maior no sensor de velocidade vertical de partícula. Ruído de baixa frequência indesejado no sensor de velocidade vertical de partícula pode ser removido antes da decomposição pela substituição da parte de baixa frequência dos dados de velocidade vertical de partícula por um sinal de velocidade vertical de partícula predito calculado a partir do sinal de pressão. Esta predição considera fatores que incluem as propriedades do meio de propagação, o ângulo de incidência da energia recebida e o "fantasma" que surge a partir da reflexão do campo de ondas sísmicas na superfície do mar. Este processo de substituição reduz a contribuição do sensor de velocidade vertical de partícula mais ruidoso.

[0035] Este processo de substituição de baixa frequência é descrito mais completamente na Patente US 7.359.283 B2, de Svein Vaage, *et al.*; denominada "System for Combining Signals of Pressure Sensors and Particle Motion Sensors in Marine Seismic Streamers"; expedida em 15 de abril de 2008; e designada para uma companhia filiada do cessionário da presente invenção. Vaage *et al.* descreve um método para combinar sinais de um sensor de pressão e de um sensor de movimento de partícula gravados em um cabo sísmico rebocável marítimo para reduzir o ruído no sinal combinado do sensor de pressão e do sensor de movimento de partícula, o sinal gravado do sensor de pressão possuindo uma largura de banda compreendendo uma primeira faixa de frequências e uma segunda faixa de frequências, a primeira faixa de frequências estando em menores frequências do que as frequências da segunda faixa de frequências, e o sinal gravado do sensor de movimento de partícula possuindo uma largura de banda compreendendo pelo menos a segunda faixa de frequências. O método compreende calcular um sinal do sensor de movimento de partícula na primeira faixa de frequências a partir do sinal gravado do sensor de pressão, desse modo gerando um sinal simulado do sensor de movi-

mento de partícula na primeira faixa de frequências; combinar o sinal simulado do sensor de movimento de partícula somente na primeira faixa de frequências com o sinal gravado do sensor de movimento de partícula na segunda faixa de frequências para gerar um sinal combinado de sensor de movimento de partícula possuindo substancialmente a mesma largura de banda que a largura de banda do sinal gravado do sensor de pressão, e combinar o sinal gravado do sensor de pressão com o sinal combinado do sensor de movimento de partícula para processamento adicional.

[0036] A invenção supera os problemas de descontinuidade por proporcionar um método que executa todas as operações em relação aos pares correspondentes de traços de pressão e de velocidade vertical de partícula gravados em cada estação receptora do cabo sísmico rebocável. Assim, o método da invenção não requer modificar a geometria de gravação da aquisição para evitar descontinuidade.

[0037] A invenção emprega os sinais combinados dos sensores de pressão (tipicamente hidrofones) e de sensores de velocidade vertical de partícula (tipicamente geofones) localizados nos cabos sísmicos rebocáveis. Os sinais combinados podem ser então utilizados para gerar os componentes do campo de ondas de subida e de descida, os quais são úteis para processamento sísmico adicional, tal como atenuação de múltiplos nos dados sísmicos marítimos. Uma vez que um sinal gravado de velocidade vertical de partícula frequentemente é contaminado pelo ruído de baixa frequência devido às vibrações em um cabo sísmico rebocável, a relação de sinal-ruído para os sinais combinados seria ruim. O sinal de velocidade vertical de partícula pode ser calculado a partir do sinal do sensor de pressão dentro de uma dada faixa de frequências se o espectro do sinal do sensor de pressão possuir uma relação de sinal-ruído satisfatória dentro desta faixa de frequências (e não possuir recortes dentro desta faixa de frequências)

e se a profundidade dos sensores de pressão e de velocidade vertical de partícula for conhecida. Se a profundidade até os sensores for desconhecida, a profundidade pode ser calculada a partir da frequência dos recortes espectrais introduzidos pela reflexão de superfície, um processo que é bem conhecido na técnica.

[0038] A parte de baixa frequência do sinal de velocidade vertical de partícula frequentemente terá que ser substituída devido à mesma possuir uma baixa relação de sinal-ruído. A parte correspondente do sinal de pressão a ser utilizada para calcular o sinal de movimento de partícula tipicamente irá possuir uma boa relação de sinal-ruído nesta faixa de baixas frequências. Portanto, a profundidade do sensor de pressão de preferência é escolhida de modo que a frequência do primeiro recorte espectral no sinal de pressão, causada pela reflexão de superfície, seja maior do que a faixa de baixas frequências na qual o sinal de velocidade vertical de partícula é calculado e substituído.

[0039] O método da invenção é particularmente útil para cabos sísmicos rebocáveis marítimos, desde que a vibração de um cabo sísmico rebocável adiciona uma quantidade significativa de ruído para o sinal do sensor de movimento de partícula. Assim, o método da invenção será ilustrado em termos de cabos sísmicos rebocáveis. A invenção proporciona um dispositivo para executar o cálculo de substituição de baixa frequência de um sinal de velocidade vertical de partícula do cabo sísmico rebocável quando a geometria de disparo é tal que coletas de disparo comum são espacialmente serrilhadas em uma ou mais dimensões.

[0040] O método da invenção é para calcular ângulos de chegada não-verticais, $\phi(t)$, em cada estação receptora de duplo sensor, em função do tempo de gravação t , a partir das velocidades aparentes $V_{app}(t)$ dos eventos de reflexão no domínio de tempo de deslocamento (x, t) da fonte até o receptor, como determinadas a partir da análise de

velocidade. Se o sinal gravado de velocidade de partícula $g(t)$ não for corrompido pelo ruído do reboque, então, cada amostra de tempo deste sinal gravado de velocidade vertical de partícula é simplesmente dimensionado pelo fator $\frac{1}{\cos[\phi(t)]}$ antes de combinar o mesmo com seu sinal gravado de pressão correspondente $h(t)$.

[0041] Entretanto, se o sinal gravado de velocidade vertical de partícula $g(t)$ for corrompido pelo ruído do reboque, então, a invenção proporciona um método eficiente para manipular o cálculo de substituição de baixa frequência do sinal de velocidade vertical da partícula.

[0042] A invenção determina o ângulo de chegada vertical em função do tempo em cada estação receptora do cabo sísmico rebocável. O ângulo de chegada dependente do tempo que é utilizado tanto para dimensionar o sinal de velocidade vertical de partícula em uma faixa de frequências superior, como para calcular um sinal simulado de velocidade vertical de partícula a partir do sinal de pressão gravado na faixa de baixas frequências. Utilizar um ângulo de chegada dependente do tempo evita os problemas de serrilhados dos métodos anteriores. Apesar de que o ângulo de chegada dependente do tempo poderia ser aplicado no domínio de tempo, a invenção utiliza uma concretização no domínio de frequência que é muito mais computacionalmente eficiente.

[0043] As Figuras 1 a 7 apresentam fluxogramas ilustrando concretizações da invenção para atenuar ruído de baixa frequência nos dados do cabo sísmico rebocável de duplo sensor. A Figura 1 é um fluxograma ilustrando uma descrição geral da invenção. As Figuras 2 e 3 são fluxogramas adicionalmente ilustrando partes particulares da invenção como descritas na Figura 1. A Figura 4 é um fluxograma ilustrando a determinação de análise de velocidade apropriada para determinar ângulos de chegada. As Figuras 5 a 7 são fluxogramas ilus-

trando os diferentes tipos de análise de velocidade apropriados para determinar ângulos de chegada para diferentes tipos de inclinação geológica na Figura 4.

[0044] A Figura 1 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para combinar sinais de pressão e sinais de velocidade vertical de partícula em cabos sísmicos rebocáveis com duplo sensor.

[0045] No bloco 11, um sinal combinado de velocidade vertical de partícula é gerado pela combinação de um sinal gravado de velocidade vertical de partícula, dimensionado em uma faixa de frequências superiores, utilizando um ângulo de chegada dependente do tempo, como determinado pela análise de velocidade, com um sinal simulado de velocidade de partícula, calculado em uma faixa de baixas frequências, a partir de um sinal de pressão gravado utilizando um filtro variável no tempo baseado no ângulo de chegada dependente do tempo.

[0046] No bloco 12, os sinais combinados de pressão e de velocidade vertical de partícula são gerados pela combinação dos sinais de pressão gravado e de velocidade de partícula combinados a partir do bloco 11.

[0047] A Figura 2 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para combinar um sinal de velocidade vertical de partícula dimensionado em uma faixa de frequências superiores com um sinal de velocidade de partícula, calculado a partir de um sinal de pressão gravado em uma faixa de frequências inferiores, para um conjunto de ângulos de chegada. A Figura 2 ilustra em mais detalhes a parte da invenção discutida no bloco 11 da Figura 1 acima.

[0048] No bloco 21, os sinais de pressão $h^{recd}(t) \equiv h^{recd}(x,t)$ e os sinais do sensor de velocidade vertical de partícula $g^{recd}(t) \equiv g^{recd}(x,t)$ são gravados em uma estação receptora em um cabo sísmico rebocável de duplo sensor. Está dentro do escopo da invenção que outros tipos de sensores sísmicos sejam empregados na invenção. Assim,

por generalidade, os sinais gravados serão referidos como sinais de pressão, em vez de que como sinais do sensor de pressão, e como sinais de velocidade de partícula em vez de que como sinais do sensor de velocidade de partícula. Os outros tipos de sensores sísmicos poderiam incluir, mas não estão limitados, a sensores de velocidade de partícula multidirecionais, sensores de deslocamento de partícula, sensores de aceleração de partícula, ou sensores de gradiente de pressão sendo utilizados ao invés ou em adição aos sensores de velocidade vertical de partícula. Os sensores de pressão e de velocidade vertical de partícula podem ser empregados sozinhos, mas são mais comumente empregados nas séries de sensores. Adicionalmente, os sensores de pressão e os sensores de velocidade de partícula tipicamente são posicionados juntos nos cabos sísmicos rebocáveis, colocado em pares ou em pares de séries.

[0049] O método da invenção emprega sensores de movimento de partícula que são responsivos aos movimentos das partículas do meio (água) com o qual os sensores de movimento são acoplados. Em geral, os sensores de movimento de partícula podem ser responsivos ao deslocamento das partículas, à velocidade das partículas, ou à aceleração das partículas no meio. Os sensores de velocidade de partícula tipicamente são empregados e assim são utilizados para ilustrar a presente invenção. Se sensores de movimento forem utilizados, os quais são responsivos à posição, o sinal de posição pode ser diferenciado para converter o mesmo para um sinal de velocidade, por dispositivos de cálculo bem conhecidos na técnica. Se sensores de movimento são utilizados, os quais são responsivos à aceleração (acelerômetros), o sinal de aceleração pode ter a sua integral determinada para converter o mesmo para um sinal de velocidade, por dispositivos de cálculo bem conhecidos na técnica.

[0050] No bloco 22, os sinais de pressão gravados $h(t)$ e os sinais

de velocidade vertical de partícula $g(t)$ a partir do bloco 21 são temporariamente transformados de um domínio do tempo para produzir $H(\omega)$ e $G(\omega)$, respectivamente em um domínio de frequência. Na discussão seguinte, os sinais no domínio do tempo são denotados por letras minúsculas, enquanto os mesmos sinais no domínio de frequência são denotados pelas letras maiúsculas correspondentes. Aqui, ω é uma frequência radial em radianos/segundos, igual à $2\pi f$ para a frequência temporal f em Hertz. Em uma concretização ilustrada da invenção, os cálculos (e as operações seguintes) são feitos no domínio de frequência. Assim, as transformações podem ser feitas por qualquer transformação temporal bem conhecida, tal como, por exemplo, transformadas de Fourier. Entretanto, esta escolha da transformação é somente por conveniência e não significa ser uma limitação da invenção.

[0051] Adicionalmente, os sinais transformados de pressão e de velocidade de partícula, $H(\omega)$ e $G(\omega)$, respectivamente, são corrigidos em relação às diferenças relativas nas funções de transferência do instrumento, as quais correspondem às respostas de impulso do instrumento no domínio do tempo. Estas correções poderiam corrigir a amplitude e a fase dos sinais de pressão para corresponderem aos sinais de velocidade de partícula, ou, em uma concretização alternativa, corrigir os sinais de velocidade de partícula para corresponderem aos sinais de pressão, ou, em uma com concretização alternativa adicional, corrigir ambos os conjuntos de dados para uma base comum. A correção em relação às diferenças relativas nas respostas de impulso do instrumento é bem conhecida na técnica. Finalmente, um dimensionamento de amplitude igual à impedância acústica da água de preferência é aplicado para os sinais de velocidade de partícula para corrigir as diferenças relativas nas amplitudes de pressão e de velocidade de partícula. Isto também é bem conhecido na técnica.

[0052] No bloco 23, um conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ é se-

leccionado. O conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ é selecionado para cobrir a faixa de ângulos de chegada, medidos a partir da vertical, esperados para serem encontrados para ondaletas de reflexão nos sinais de pressão gravados $h^{\text{recd}}(t)$ e nos sinais de velocidade vertical de partícula $g^{\text{recd}}(t)$ obtidos no bloco 21. O conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ pode ser designado como o conjunto $\{\phi_j\}$, para $j = 0, 1, 2, \dots, N\}$ para algum número total selecionado de ângulos de chegada igual a $N + 1$. Em uma concretização ilustrativa com $N = 60$, um conjunto de 61 ângulos de chegada ϕ_j é igual ao conjunto $\{\phi_j\} = \{0^0, 1^0, 2^0, \dots, 60^0\}$, correspondendo a $j = 0, 1, 2, \dots, 60$, respectivamente.

[0053] No bloco 24, um ângulo de chegada ϕ_j é selecionado a partir do conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ no bloco 23. De preferência, os ângulos de chegada são selecionados de uma maneira sistemática, tal como continuando sequencialmente através dos ângulos de chegada ϕ_j na ordem $j = 0, 1, 2, \dots, N$.

[0054] No bloco 25, um sinal simulado de velocidade de partícula $G_j^{\text{calc}}(\omega)$ é calculado em uma faixa de frequências inferiores a partir de um sinal de pressão transformado $H(\omega)$ a partir do bloco 22, sem utilizar o sinal gravado de velocidade vertical de partícula, para o ângulo de chegada ϕ_j selecionado no bloco 24. A parte de baixa frequência do espectro de frequências $G_j^{\text{calc}}(\omega)$ do sensor de velocidade de partícula pode ser calculada a partir do espectro de frequência $H(\omega)$ do sensor de pressão correspondente. Este cálculo pode ser feito, por exemplo, por utilizar a expressão:

$$G_j^{\text{calc}}(\omega) = \frac{1 + Z_j}{1 - Z_j} H(\omega) \quad (1)$$

[0055] na faixa de frequência inferior. Na Equação (1), Z_j é um operador de retardo de tempo, o qual pode ser expresso por:

$$Z_j = \exp[-i\omega\tau_j] = \cos(\omega\tau_j) - i \sin(\omega\tau_j),$$

[0056] onde τ_j é o atraso de tempo de reflexão fantasma em segundos dada por:

$$\tau_j = \cos(\phi_j) \frac{2D}{c}.$$

[0057] Aqui, $i = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária, ϕ_j é o ângulo de chegada selecionado no bloco 24, D é a profundidade do receptor em metros e c é a velocidade do som no meio em metros/segundo. Na água, c é cerca de 1500 m/s. A profundidade D pode ser determinada por qualquer dispositivo conhecido na técnica, tal como por um sensor de profundidade ou por um cálculo.

[0058] Para cada valor de ângulo de chegada ϕ_j , a Equação (1) é avaliada em relação aos valores de frequência ω correspondendo à frequência f na faixa de cerca de 1 Hz até um valor menor do que este que faz com que $(1 - Z_j)$ seja igual a zero, a qual é a frequência do primeiro recorte espectral no espectro do sinal de pressão.

[0059] No bloco 26, o sinal transformado de velocidade vertical de partícula $G(\omega)$ a partir do bloco 22 é dimensionado em uma faixa de frequências superiores. O sinal transformado de velocidade vertical de partícula $G(\omega)$ a partir do bloco 22 é dimensionado em amplitude para compensar a sensibilidade direcional dos sensores de velocidade vertical de partícula. Em particular, o sinal transformado de velocidade vertical de partícula $G(\omega)$ é dimensionado na faixa de frequências superiores por ser dividido pelo cosseno do ângulo de chegada ϕ_j selecionado no bloco 24, gerando um sinal de velocidade de partícula dimensionado $G_j^{scal}(\omega)$. Assim:

$$G_j^{scal}(\omega) = \frac{G(\omega)}{\cos(\phi_j)} \quad (2)$$

[0060] na faixa de frequências superiores. Em uma concretização particular, a faixa de frequências inferiores a partir do bloco 25 e a faixa de frequências superiores aqui no bloco 26 combinam para igualar

a largura de banda total do sinal de pressão transformado $H(\omega)$ a partir do bloco 22.

[0061] No bloco 27, o sinal simulado de velocidade de partícula $G_j^{\text{calc}}(\omega)$, calculado na faixa de frequências inferiores no bloco 25, é combinado com o sinal dimensionado de velocidade de partícula $G_j^{\text{s-cal}}(\omega)$, dimensionado na faixa de frequências superiores no bloco 26, para gerar um sinal combinado de velocidade de partícula $G_j^{\text{merg}}(\omega)$ possuindo substancialmente a mesma largura de banda que a largura de banda do sinal de pressão gravado $H(\omega)$, para o ângulo de chegada ϕ_j selecionado no bloco 24. Em uma concretização particular, esta combinação é feita como descrito acima na Patente US 7.359.283 B2, por Vaage *et al.*

[0062] No bloco 28, o sinal combinado de velocidade de partícula $G_j^{\text{merg}}(\omega)$ a partir do bloco 27 passa pela transformação inversa a partir do domínio de frequência para produzir $g_j^{\text{merg}}(t)$ de volta no domínio de tempo. Como dito acima, esta transformação temporal inversa pode ser feita por qualquer transformação bem conhecida, tal como, por exemplo, as transformadas inversas de Fourier. Entretanto, esta escolha da transformada é somente por conveniência e não significa uma limitação da invenção.

[0063] No bloco 29, é determinado se quaisquer ângulos de chegada ϕ_j permanecem a partir do conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ selecionado no bloco 23. Se quaisquer ângulos de chegada ϕ_j permanecerem, então o processo retorna para o bloco 24 para selecionar outro ângulo de chegada ϕ_j . Se nenhum ângulo de chegada ϕ_j permanecer, então o processo termina.

[0064] A Figura 3 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para combinar um sinal de pressão gravado com o sinal de partícula dimensionado e combinado a partir da Figura 2, correspondendo a um ângulo de chegada determinado a partir da análise de

velocidade. A Figura 3 ilustra em mais detalhes a parte da invenção discutida no bloco 12 da Figura 1, acima.

[0065] No bloco 31, um traço de pressão e um traço de velocidade vertical de partícula são extraídos a partir dos sinais de pressão $h(t)$ e dos sinais de velocidade vertical de partícula $g(t)$, respectivamente, gravados no bloco 21 da Figura 2. Os traços sísmicos correspondem aos dados sísmicos adquiridos em cada localização de sensor nos cabos sísmicos rebocáveis de duplo sensor.

[0066] No bloco 32, amostras de tempo são extraídas em um tempo gravado t nos traços sísmicos extraídos no bloco 31 a partir dos sinais de pressão $h(t)$ e dos sinais de velocidade vertical de partícula $g(t)$.

[0067] No bloco 33, um ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado no tempo gravado nas amostras de tempo extraídas no bloco 32 a partir dos traços sísmicos extraídos no bloco 31. Em uma concretização da invenção, o cálculo do ângulo de chegada $\phi(t)$ é feito por meio da análise de velocidade. Em uma concretização particular, o ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado por meio de versões diferentes de análise de velocidade, dependendo do tamanho e da orientação do ângulo de inclinação. Esta análise de velocidade é descrita em detalhes adicionais na discussão com respeito ao fluxograma na Figura 4.

[0068] No bloco 34, é determinado qual ângulo de chegada ϕ_j do conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ a partir do bloco 23 da Figura 2 está mais próximo do ângulo de chegada $\phi(t)$ calculado no bloco 33.

[0069] No bloco 35, uma amostra de tempo do sinal de pressão gravado $h(t)$ é combinada com uma amostra de tempo do sinal combinado de velocidade de partícula correspondente $g_j^{\text{merg}}(t)$ a partir do bloco 28 da Figura 2, que corresponde ao ângulo de chegada ϕ_j determinado no bloco 34. Em uma concretização particular, a combinação das amostras de tempo refere-se à construção de componentes

de campo de ondas de subida e de descida a partir da combinação apropriada das amostras de tempo a partir dos sinais de pressão e dos sinais de velocidade de partícula. Em particular, o componente de campo de ondas de subida pode ser calculado a partir da adição apropriada dos sinais de pressão com os sinais de velocidade vertical de partícula, enquanto o componente de campo de onda de descida pode ser calculado a partir da subtração apropriada do sinal de velocidade de partícula a partir do sinal de pressão, como é bem conhecido na técnica de processamento de dados sísmicos.

[0070] No bloco 36, é determinado se mais amostras de tempo a partir do bloco 32 existem no traço sísmico a partir do bloco 31. Se existirem mais amostras de tempo, então o processo retorna para o bloco 32 para extrair outra amostra de tempo. Se não existirem mais amostras de tempo, então o processo continua para o bloco 37.

[0071] No bloco 37, os resultados da combinação das amostras de tempo no bloco 35 são emitidas como traços combinados.

[0072] No bloco 38, é determinado se mais traços sísmicos a partir do bloco 31 existem nos sinais de pressão e nos sinais de velocidade vertical de partícula. Se existirem mais traços sísmicos, então o processo retorna para o bloco 31 para extrair outro traço sísmico. Se não existirem mais traços sísmicos, então o processo termina.

[0073] A Figura 4 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar ângulos de chegada para diferentes tipos de inclinação geológica. A Figura 4 ilustra em mais detalhes a parte da invenção discutida no bloco 33 da Figura 3

[0074] No bloco 41, é determinado se a inclinação geológica na área de levantamento é menor ou maior do que 10° . Se a inclinação geológica for menor do que 10° , então o processo continua para o bloco 42. Se a inclinação geológica for maior ou igual a 10° , então o processo continua para o bloco 44.

[0075] No bloco 42, o processo vai para o bloco 51 da Figura 5 para determinar um ângulo de chegada $\phi(t)$ a partir de um tempo de gravação t a partir da análise de velocidade apropriada para uma inclinação geológica menor do que 10° .

[0076] No bloco 43, o processo retorna do bloco 58 da Figura 5 com um ângulo de chegada $\phi(t)$. Então, o processo termina.

[0077] No bloco 44, o processo vai para o bloco 61 da Figura 6 para determinar um ângulo de chegada alinhado $\phi(t)$ a partir de um tempo de gravação t a partir da análise de velocidade apropriada para uma inclinação geológica maior ou igual a 10° . Este ângulo de chegada alinhado é a projeção do ângulo de chegada real para o plano vertical passando através do ponto de disparo do traço e das localizações de receptor.

[0078] No bloco 45, o processo retorna do bloco 68 da Figura 6 com um ângulo de chegada alinhado $\phi(t)$.

[0079] No bloco 46, é determinado se existe uma inclinação geológica que seja perpendicular à linha da fonte até o receptor. Se existir uma inclinação geológica na direção transversal a esta linha, então o processo vai para o bloco 47 para determinar um ângulo de chegada α . Se não, então o processo termina.

[0080] No bloco 47, o processo vai para o bloco 71 da Figura 7 para determinar um ângulo de chegada α a partir de um tempo de gravação t a partir da análise de velocidade apropriada para uma inclinação geológica perpendicular à linha da fonte até o receptor.

[0081] No bloco 48, o processo retorna do bloco 75 da Figura 7 com um ângulo de chegada α .

[0082] As Figuras 8 a 16 apresentam gráficos, seções, e vistas que ilustram as concretizações da invenção discutidas com referência aos fluxogramas nas Figuras 1 a 7. As Figuras 8 a 10 ilustram elementos de análise de velocidade com traços sísmicos sintéticos. As Figu-

ras 11 a 13 ilustram elementos de análise de velocidade para um primeiro tipo de inclinação geológica. As Figuras 14 e 15 ilustram elementos de análise de velocidade para um segundo tipo de inclinação geológica. A Figura 16 ilustra elementos de análise de velocidade para um terceiro tipo de inclinação geológica.

[0083] A Figura 8 de forma gráfica exhibe o ângulo de chegada $\phi(t)$ 81 em um plano vertical em função do tempo de gravação t para os traços sintéticos exibidos na Figura 9. O deslocamento do disparo até o receptor dos traços de pressão e de velocidade vertical de partícula da Figura 9 é 1500 metros, e a profundidade da água é 500 metros. Pode ser visto que os ângulos de incidência verticais 81 estão na faixa de cerca de 57 graus em 1,20 segundos 82 (a reflexão no fundo da água) de cerca de 5 graus em 3,0 segundos 83.

[0084] A Figura 9 é uma seção de traços sintéticos de pressão e de velocidade vertical de partícula. O primeiro traço 91 da Figura 9 é o traço sintético de pressão calculado utilizando uma ondaleta de canhão de ar de fase mínima para cada refletor, coeficientes de reflexão aleatórios, atrasos de tempo para a criação de fantasmas correspondendo aos ângulos de chegada da Figura 8 e uma profundidade do cabo sísmico rebocável de 15 metros. O segundo traço 92 é o traço de velocidade vertical de partícula correspondente. Observe que as amplitudes deste traço de velocidade vertical de partícula 92 são menores do que estas do traço de pressão 91 devido aos ângulos de chegadas não-verticais grandes das primeiras reflexões. Observe também que não existe ruído de baixa frequência forte, o que tipicamente iria corromper um sinal real de velocidade de partícula a partir de um cabo sísmico rebocável com duplo sensor. Este ruído é omitido para melhor avaliar a eficácia deste método.

[0085] O terceiro traço 93 representa um traço de velocidade vertical de partícula perfeitamente corrigido, pronto para a soma com o tra-

ço de pressão 91 para eliminar todas as reflexões fantasmas de superfície. O quarto traço 94 é o resultado de simplesmente calcular a parte de baixa frequência do espectro do traço de velocidade de partícula a partir desta do primeiro traço 91, assumindo que todas as ondaletas de reflexão ("reflection wavelets") chegam verticalmente, e combinando o mesmo com o resto do espectro do segundo traço 92. O cálculo foi executado entre 1 e 35 Hz, e os espectros calculados e reais foram combinados entre 25 e 35 Hz.

[0086] O quinto traço 95 é o erro neste resultado, isto é, o terceiro traço 93 menos o quarto traço 94. Pode ser visto que os erros anteriores eram muito grandes. Existem duas fontes destes erros. A primeira é que nenhuma correção nas amplitudes foi aplicada para o traço de velocidade de partícula para a chegada não-vertical. A segunda é que atrasos de tempo de reflexão fantasma incorretos foram utilizados quando a parte de baixa frequência do espectro do traço de velocidade de partícula foi calculado a partir do espectro do sinal de pressão, utilizando a equação (1), e substituído.

[0087] O sexto traço 96 é o traço de velocidade de partícula composto resultante deste método, como descrito acima, e o sétimo traço 97 é o erro neste resultado (o terceiro traço 93 menos o sexto traço 96). Pode ser visto que o traço de erro é muito pequeno, e que o método descrito produz resultados muito precisos. A Figura 10 é uma seção dos traços sintéticos apresentados na Figura 9, revelados durante 3,0 segundos.

[0088] A seguir, a análise de velocidade para dados de campo será considerada. Primeiro, um método para determinar o ângulo de chegada $\phi(t)$ nas áreas de levantamento com inclinações geológicas menores do que 10° será discutido.

[0089] Gravar dados marítimos de azimute amplo de forma significativa aperfeiçoa a qualidade de dados sísmicos desejados abaixo de

volumes complexos de sal. Tais conjuntos de dados são gravados utilizando uma embarcação ou embarcações de fonte separadas fazendo disparos ao longo de linhas que são paralelas aos cabos sísmicos rebocáveis, mas são lateralmente deslocadas a partir dos mesmos por tanto quanto vários milhares de metros.

[0090] A Figura 11 é uma vista plana de uma geometria de disparo utilizada na aquisição de dados marítimos de azimute amplo. Duas embarcações de fonte 111, 112 estão colocando pontos de disparo ao longo de uma linha paralela a quatro passagens separadas da embarcação do cabo sísmico rebocável 113 através da área de levantamento. Os oito cabos sísmicos rebocáveis 114 foram separados por 125 metros, de modo que a distância das estações de gravação na direção transversal ao cabo sísmico rebocável para cada linha de disparo era 4000 metros. Os disparos foram alternados entre as embarcações de disparo dianteira e traseira 111, 112, e a mesma linha de disparo foi repetida quatro vezes, uma vez para cada uma das passagens ilustradas da embarcação do cabo sísmico rebocável 113. Uma vez completa, a localização da linha de disparo e as passagens da embarcação do cabo sísmico rebocável 113 foram deslocadas 250 metros na direção transversal ao cabo sísmico rebocável.

[0091] Para geometrias de gravação de azimute amplo, tal como o exemplo ilustrado na Figura 11, o espaçamento da estação receptora ao longo de cada cabo sísmico rebocável é muito próximo (tipicamente 12,5 metros), e não existe problema de serrilhado espacial nesta dimensão. Entretanto, na direção transversal ao cabo sísmico rebocável, os dados são severamente espacialmente serrilhados pelo espaçamento de 125 metros do cabo sísmico rebocável, e métodos, tal como, por exemplo, este de Vaage *et al.*, irão falhar.

[0092] A Figura 12 ilustra os tempos de chegada de cinco eventos de reflexão (números de referencia 121 a 125) que podem ser grava-

dos a partir da estação receptora 1 115 (na Figura 11) em cada cabo sísmico rebocável (as estações receptoras mais próximas da embarcação do cabo sísmico rebocável) como resultado dos quatro disparos no ponto de disparo ilustrado pela "estrela" 116 (na Figura 11) atrás do barco de disparo dianteiro 111 (na Figura 11). Portanto, existem 32 traços (linhas verticais) 126 com distâncias da fonte até o receptor (deslocamentos) na faixa de 125 a 4000 metros.

[0093] Por exemplo, observe que a inclinação do terceiro evento de reflexão 123, onde ele cruza o traço com o deslocamento da fonte até o receptor de 2250 metros em um tempo de cerca de 2,0 segundos, 127, indica a velocidade horizontal aparente na qual o evento estava se propagando quando ele chegou à estação receptora. Neste caso, esta inclinação e velocidade horizontal aparente foi cerca de 3021 metros/segundo. O conhecimento desta velocidade horizontal aparente do evento permite o cálculo de seu ângulo de chegada ϕ nesta estação receptora. Isto pode ser explicado utilizando a Figura 13, a qual é uma vista lateral esquemática de uma onda de som em um ângulo de chegada não-vertical.

[0094] A Figura 13 representa uma onda de som chegando a uma estação receptora a partir de baixo em um ângulo de ϕ graus a partir da vertical. Pode ser visto que no tempo, Δt , ela pega a frente da onda para percorrer do ponto A até o ponto B (o produto da velocidade de ondas de som na água, 1500 metros/segundos, e Δt), a frente da onda percorreu a distância horizontal a partir dos pontos C até B, igual ao produto da velocidade horizontal aparente da frente da onda, v_{app} , e Δt . A partir do triângulo retângulo formado pelos pontos A, B e C, pode ser visto que

$$\sin(\phi) = \frac{c \Delta t}{v_{app} \Delta t} = \frac{c}{v_{app}}. \quad (3)$$

[0095] onde c = velocidade do som na água = 1500 m/s.

[0096] Segue a partir da Equação (3) que ϕ é dado por:

$$\phi = \arcsin\left(\frac{c}{v_{app}}\right). \quad (4)$$

[0097] Para o evento 123 da Figura 12 em 2,0 segundos, a Equação (4) fornece o ângulo de chegada a partir da vertical, ϕ , na estação de gravação com o deslocamento da fonte até o receptor de 2250 metros como:

$$\phi = \arcsin\left(\frac{1500}{3021}\right) = 29.8^\circ.$$

[0098] Um ângulo de chegada $\phi(t)$ para cada amostra de tempo gravada em cada traço gravado é necessário. Felizmente, a equação do local de eventos, tal como os cinco eventos de reflexão representados no plano $x - t$ da Figura 12 é conhecida. A equação é esta de uma hipérbole, a qual, para inclinações geológicas pequenas, é dada por:

$$t^2 = t_0^2 + \left[\frac{x}{v(t_0)}\right]^2, \quad (5)$$

[0099] onde t é o tempo de gravação, t_0 é o cruzamento com deslocamento zero da hipérbole; x é o deslocamento da fonte até o receptor; e $v(t_0)$ é a função de velocidade, em função do tempo com deslocamento zero t_0 que melhor descreve a mudança hiperbólica dos eventos de reflexão nos traços da Figura 12.

[00100] A função de velocidade, $v(t_0)$ é determinada a partir dos traços de dados utilizando métodos de varredura e de interpretação de velocidade bem conhecidos. Entretanto, as análises de preferência são executadas em coletas de disparo comum de traços, ao invés do que em coletas de ponto médio comum. É vantajoso utilizar os traços de pressão gravados para esta análise devido à sua relação de sinal-ruído ser quase sempre superior a esta dos traços de velocidade vertical de partícula.

[00101] A Figura 5 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar ângulos de chegada para inclinações geológicas menores do que 10° . A Figura 5 ilustra em mais detalhes uma parte da invenção discutida no bloco 33 da Figura 3. Em particular, o processo vem para a Figura 5 a partir do bloco 42 da Figura 4 para calcular um ângulo de chegada e retorna para o bloco 43 da Figura 4 com o ângulo de chegada calculado.

[00102] No bloco 51, a análise de velocidade é executada para determinar uma função de velocidade para os eventos de reflexão no traço sísmico extraído no bloco 31 da Figura 3. Em uma concretização particular, a função de velocidade é determinada como pares $v(t_0)$ de velocidade e tempo de deslocamento zero t_0 para funções hiperbólicas que melhor descrevem a mudança hiperbólica dos eventos de reflexão no domínio de tempo de deslocamento (x, t) .

[00103] No bloco 52, um deslocamento de receptor até a fonte x é selecionado para o traço sísmico.

[00104] No bloco 53, uma amostra de tempo é selecionada no traço sísmico.

[00105] No bloco 54, o par $v(t_0)$ de velocidade e de tempo de deslocamento zero t_0 descrevendo a função de velocidade a partir do bloco 51 é determinado, o qual define a função hiperbólica que cruza o traço sísmico na amostra de tempo selecionada no bloco 53. Esta função hiperbólica representa um evento de reflexão chegando nesta amostra de tempo.

[00106] No bloco 55, um tempo de gravação t é calculado para a amostra de tempo selecionada no bloco 53. O tempo de gravação t é calculado a partir da função de velocidade determinada no bloco 51. Em uma concretização, o tempo de gravação t é calculado a partir do deslocamento x a partir do bloco 52 e do par $v(t_0)$ de velocidade e do tempo de deslocamento zero t_0 a partir do bloco 54. Nesta concretiza-

ção particular, o tempo de gravação t pode ser calculado por se tirar a raiz quadrada da Equação (5):

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x}{v(t_0)^2}}. \quad (6)$$

[00107] No bloco 56, uma velocidade aparente $v_{app}(t)$ é calculada para o evento de reflexão no bloco 54 chegando na amostra de tempo a partir do bloco 53. Em uma concretização, a velocidade aparente $v_{app}(t)$ é calculada a partir do deslocamento x do bloco 52, da velocidade $v(t_0)$ a partir do bloco 54, e do tempo de gravação t calculado no bloco 55. Nesta concretização particular, a inclinação das curvas para os eventos de reflexão na Figura 5, e, portanto, a velocidade horizontal aparente para cada tempo gravado t em um traço sísmico com o deslocamento x é encontrada por primeiro calcular a derivada da Equação (5), produzindo:

$$2t \, dt = \frac{2x \, dx}{v(t_0)^2}. \quad (7)$$

[00108] Então, reajustando os termos na Equação (7) é fornecida a velocidade aparente $v_{app}(t)$:

$$v_{app}(t) = \frac{dx}{dt} = \left(\frac{t}{x} \right) v(t_0)^2. \quad (8)$$

[00109] No bloco 57, um ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado para a mesma amostra de tempo t a partir do bloco 53. Em uma concretização, o ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado a partir da velocidade do som no meio c e da velocidade aparente $v_{app}(t)$ calculada no bloco 56. Em um concretização particular, o ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado a partir da Equação (4):

$$\phi(t) = \arcsin \left(\frac{c}{v_{app}(t)} \right).$$

[00110] No bloco 58, o processo retorna para o bloco 43 da Figura

4 com o ângulo de chegada $\phi(t)$ calculado no bloco 56.

[00111] A seguir, o método para determinar $\phi(t)$ nas áreas de levantamento com inclinações geológicas maiores que 10° será discutido. A Figura 14 é uma segunda vista lateral esquemática de uma onda de som em um ângulo de chegada não-vertical. Levin, F. K., em seu artigo de 1971, "Apparent velocity from dipping interface reflections", *Geophysics*, Vol. 36, Nº 3, páginas 510 a 516, executou uma análise do efeito da inclinação geológica sobre as velocidades de empilhamento calculadas a partir de coletas de traço de ponto médio comum. Entretanto, Levin iniciou com a equação para o tempo de percurso a partir de um ponto de disparo 141 em uma superfície 142 até um ponto de reflexão 143 em um leito de inclinação 144 para uma estação receptora 145 x metros a partir do ponto de disparo 141. Esta equação é:

$$v(t_0)^2 t^2 = 4d^2 + x^2 - 4dx \cos(\alpha), \quad (9)$$

onde

[00112] d é distância ao longo da linha 146 a partir do ponto de disparo 141 até a superfície de reflexão 144, perpendicular a esta superfície de reflexão 144, e α é o ângulo entre o plano horizontal da superfície 142 e a linha 146 representando a distância d .

[00113] A geometria da Figura 14 apresenta que $\cos(\alpha)$ é igual a $\text{seno}(\xi)$, onde ξ é o componente de inclinação na direção a partir do ponto de disparo até o receptor. Adicionalmente, ξ é positivo se o receptor for acima da inclinação a partir do ponto de disparo, e ξ é negativo se abaixo da inclinação. (Levin utilizou ϕ ao invés de ξ para representar o ângulo de inclinação do leito de reflexão).

[00114] Reajustando os termos da Equação (9), e reconhecendo

que $\frac{2d}{v(t_0)} = t_0$, o tempo de reflexão do deslocamento zero, leva a:

$$t^2 = t_0^2 + \left[\frac{x}{v(t_0)} \right]^2 - \frac{t_0 2x \sin(\xi)}{v(t_0)}. \quad (10)$$

[00115] A Equação (10) descreve o lócus dos tempos de chegada para um evento de reflexão a partir de um refletor de inclinação em uma coleta de traços de disparo comum. Observe que para pequenos valores de inclinação, ξ , $\sin(\xi)$ no último termo é muito pequeno ou zero, de modo que a Equação (10) se torna essencialmente idêntica à Equação (5).

[00116] A Figura 15 contém representações gráficas desta curva da Equação (10) para o segundo evento de reflexão 122 da Figura 12 ($t_0 = 1,04$ segundos, $v(t_0) = 1700$ m/s) para ângulos de inclinação ξ na faixa de -40° até $+40^\circ$ por incrementos de 10° . A curva do meio 151 corresponde ao ângulo de inclinação $\xi = 0$. Pode ser visto que, para ângulos de inclinação positivos 152 (isto é, receptores acima da inclinação a partir do ponto de disparo), os ápices das hipérbolas são deslocados para distâncias positivas de fonte até o receptor. Para ângulos de inclinação negativos 153, o oposto é verdadeiro, apesar de distâncias de fonte até o receptor negativas não serem representadas graficamente na Figura 15.

[00117] Pode ser visto que, na presença de inclinações geológicas maiores do que 10° , o algoritmo de varredura de velocidade utilizado nas coletas de traços de posição de disparo comum precisa utilizar a Equação (10) e inclui um parâmetro adicional, ângulo de inclinação ξ . Estas análises também devem ser executadas de uma maneira dependente do azimute do receptor do disparo, e as funções de velocidade resultantes utilizadas da mesma maneira. Tais análises de velocidade podem ser executadas de modo esparsa através da área de levantamento (por exemplo, nas localizações de ponto de disparo espaçadas a cada quatro quilômetros no cabo sísmico rebocável e nas direções transversais ao cabo sísmico rebocável) e linearmente inter-

poladas.

[00118] A Figura 6 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar um ângulo de chegada para a inclinação geológica maior do que 10° . A Figura 6 ilustra em mais detalhes uma parte da invenção discutida no bloco 33 da Figura 3. Em particular, o processo vem para a Figura 6 a partir do bloco 44 da Figura 4 para calcular um ângulo de chegada e retornar para o bloco 45 da Figura 4 com o ângulo de chegada calculado.

[00119] No bloco 61, a análise de velocidade é executada para determinar uma função de velocidade para os eventos de reflexão no traço sísmico extraído no bloco 31 da Figura 3. Em uma concretização particular, a função de velocidade é determinada como os conjuntos de velocidade $v(t_0)$, tempo de deslocamento zero t_0 , e ângulo de inclinação ξ para funções hiperbólicas que melhor descrevem o movimento hiperbólico dos eventos de reflexão no domínio de tempo de deslocamento (x, t) .

[00120] No bloco 63, uma amostra de tempo é selecionada no traço sísmico.

[00121] No bloco 64, o conjunto de velocidade $v(t_0)$, tempo de deslocamento zero t_0 e ângulo de inclinação ξ descrevendo a função de velocidade a partir do bloco 61 é determinado, o qual define a função hiperbólica que cruza o traço sísmico na amostra de tempo selecionada no bloco 63. Esta função hiperbólica representa um evento de reflexão chegando nesta amostra de tempo.

[00122] No bloco 65, um tempo de gravação t é calculado para a amostra de tempo selecionada no bloco 63. O tempo de gravação t é calculado a partir da função de velocidade determinada no bloco 61. Em uma concretização, o tempo de gravação t é calculado a partir do deslocamento x a partir do bloco 62 e do conjunto de velocidade $v(t_0)$, tempo de deslocamento zero t_0 e ângulo de inclinação ξ a partir do

bloco 64. Nesta concretização particular, o tempo de gravação t pode ser calculado por se tirar a raiz quadrada da Equação (10).

[00123] Com a função de velocidade especificada pelos parâmetros t_0 , $v(t_0)$ e ξ , para cada traço com deslocamento x e cada valor de t_0 , t é calculado a partir da Equação (10), como:

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v(t_0)^2} - \frac{t_0 2x \sin(\xi)}{v(t_0)}}. \quad (11)$$

[00124] No bloco 66, uma velocidade aparente $v_{app}(t)$ é calculada para o evento de reflexão no bloco 64 chegando na amostra de tempo a partir do bloco 63. Em uma concretização, a velocidade aparente $v_{app}(t)$ é calculada a partir do deslocamento x do bloco 62, do conjunto de velocidade $v(t_0)$, tempo de deslocamento zero t_0 , e ângulo de inclinação ξ a partir do bloco 64, e o tempo de gravação t calculado no bloco 65. Nesta concretização particular, a velocidade aparente $v_{app}(t)$ é calculada a partir da inclinação da curva da Equação (10), para determinar a velocidade horizontal aparente de um evento de reflexão chegando em um estação receptora. A inclinação é calculada por se tirar a derivada da Equação (10), produzindo:

$$2t \, dt = \frac{2x \, dx}{v(t_0)^2} - \left[\frac{t_0 2 \sin(\xi)}{v(t_0)} \right] dx. \quad (12)$$

[00125] Então, reajustando os termos na Equação (12), se obtém a velocidade aparente $v_{app}(t)$:

$$v_{app}(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{t v(t_0)^2}{x - t_0 v(t_0) \sin(\xi)}. \quad (13)$$

[00126] No bloco 67, um ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado para a amostra de tempo t a partir do bloco 63. Em uma concretização, o ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado a partir da velocidade do som no meio c e da velocidade aparente $v_{app}(t)$ calculada no bloco 66. Em uma concretização particular, o ângulo de chegada $\phi(t)$ é calculado a

partir da Equação (4):

$$\phi(t) = \arcsin\left(\frac{c}{v_{app}(t)}\right).$$

[00127] No bloco 68, o processo retorna para o bloco 45 da Figura 4 com o ângulo de chegada $\phi(t)$ calculado no bloco 67.

[00128] A seguir, será discutido um método para considerar inclinações geológicas perpendiculares à linha da fonte até o receptor. Lembre-se que a Figura 12 ilustra os tempos de chegada de cinco eventos de reflexão que podem ser gravados a partir da estação receptora 1 em cada cabo sísmico rebocável (as estações receptoras mais próximas da embarcação do cabo sísmico rebocável) como resultado dos quatro disparos no ponto de disparo ilustrado pela estrela 116 atrás do barco de disparo dianteiro 111 na Figura 11. Estas curvas são válidas se existir pouca ou nenhuma inclinação geológica ao longo da linha a partir deste ponto de disparo até estas localizações receptoras. Curvas como estas na Figura 15 se aplicam se existir uma inclinação significativa ao longo desta linha. Entretanto, mesmo que no entanto os formatos destas curvas sejam influenciados se um ou mais dos refletores possuir inclinação em uma direção transversal à linha a partir deste ponto de disparo até estes receptores, o ângulo de chegada nos receptores seria afetado. Isto pode ser entendido, e a correção derivada, com a ajuda da Figura 16.

[00129] A Figura 16 é uma vista lateral esquemática de um refletor com uma inclinação perpendicular à linha a partir da fonte até o receptor. A Figura 16 representa um refletor com inclinação igual a ξ graus em um direção transversal ao eixo geométrico y (o círculo pequeno) que corre para dentro e para fora do plano da página. O eixo geométrico y é a linha conectando a localização do ponto de disparo com os receptores representados nas Figuras 12 e 15. A seta perpendicular a e se estendendo a partir do refletor de inclinação até o eixo geométrico

y representa um dos caminhos do raio de reflexão a partir do ponto de disparo até as localizações de receptor. Além disso, são apresentados o eixo geométrico x e o eixo geométrico z, bem como suas contrapartes, x^* e z^* , os quais foram girados ξ graus ao redor do eixo geométrico y para fazer o eixo geométrico z^* se situar no plano que é perpendicular ao refletor e contém o eixo geométrico y^* e os caminhos de raio a partir do ponto de disparo até o refletor e até os receptores. Portanto, existem dois sistemas de coordenadas cartesianas exibidos, x y z e $x^* y^* z^*$, em que o eixo geométrico y e o eixo geométrico y^* são idênticos.

[00130] Utilizando a análise descrita na seção anterior, um evento de reflexão particular pode parecer chegar em uma estação receptora com um ângulo de chegada a partir da vertical de ϕ graus. Entretanto, o efeito em seu ângulo de chegada de um caminho de raio que se situa no plano descrito acima, o qual contém o eixo geométrico y e é perpendicular ao refletor de inclinação da Figura 8, ainda não foi considerado.

[00131] O evento de reflexão de chegada representado na Figura 16 pode ser expresso na notação clássica de vetor por um vetor unitário \mathbf{a}^* , expresso no sistema de coordenadas $x^* y^* z^*$, como:

$$\begin{aligned}\mathbf{a}^* &= v_1^* \mathbf{i}^* + v_2^* \mathbf{j}^* + v_3^* \mathbf{k}^* \\ &= 0 \mathbf{i}^* + \sin(\phi) \mathbf{j}^* + \cos(\phi) \mathbf{k}^*\end{aligned}\quad (14)$$

[00132] onde \mathbf{i}^* , \mathbf{j}^* e \mathbf{k}^* são os vetores unitários de direção para os eixos geométricos x^* , y^* , e z^* , respectivamente. Por definição, um vetor unitário possui comprimento, ou valor absoluto, igual a 1. A segunda linha da Equação (14) é determinada pela geometria da Figura 16.

[00133] Para determinar o ângulo entre este vetor e o eixo geométrico z da coordenada x y z, devemos executar uma transformação de vetor a partir do sistema de coordenadas x^*, y^*, z^* para o sistema x y z onde ele será expresso pelo vetor a, dado por:

$$\mathbf{a} = v_1 \mathbf{i} + v_2 \mathbf{j} + v_3 \mathbf{k} \quad (15)$$

[00134] Utilizando equações de transformação de coordenadas bem conhecidas,

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}\mathbf{a}^*$$

ou

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^* \\ v_2^* \\ v_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}v_1^* + a_{21}v_2^* + a_{31}v_3^* \\ a_{12}v_1^* + a_{22}v_2^* + a_{32}v_3^* \\ a_{13}v_1^* + a_{23}v_2^* + a_{33}v_3^* \end{bmatrix}. \quad (16)$$

[00135] O produto escalar do vetor (ou interno) de dois vetores, tal como \mathbf{d} e \mathbf{e} são definidos como

$$\mathbf{d} \cdot \mathbf{e} \equiv |\mathbf{d}||\mathbf{e}| \cos(\theta) \quad (17)$$

[00136] onde o ponto "." designa o produto escalar, "|." designa o valor absoluto do vetor \mathbf{d} ou \mathbf{e} , e θ é o ângulo entre os dois vetores \mathbf{d} e \mathbf{e} . A Equação (17) é equivalente a:

$$\mathbf{d} \cdot \mathbf{e} = [d_1 \quad d_2 \quad d_3]^T \cdot [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T = d_1e_1 + d_2e_2 + d_3e_3 \quad (18)$$

[00137] Os valores dos elementos a_{ij} para a matriz de transformação de coordenada \mathbf{A} são dados pelos produtos escalares dos vetores unitários de direção para os dois sistemas de coordenadas, como:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}^* \cdot \mathbf{i} & \mathbf{i}^* \cdot \mathbf{j} & \mathbf{i}^* \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{j}^* \cdot \mathbf{i} & \mathbf{j}^* \cdot \mathbf{j} & \mathbf{j}^* \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{k}^* \cdot \mathbf{i} & \mathbf{k}^* \cdot \mathbf{j} & \mathbf{k}^* \cdot \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (19)$$

[00138] Utilizar a geometria da Figura 16 para avaliar os valores dos produtos escalares dos vetores unitários de direção na Equação (19) fornece:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos(\xi) & 0 & -\cos(90 - \xi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos(90 - \xi) & 0 & \cos(\xi) \end{bmatrix} \quad (20).$$

[00139] Portanto, substituir os valores para a_{ij} a partir da Equação (20) e os valores para v_i^* a partir da Equação (14), na Equação (16) fornece:

$$\begin{aligned}
v_1 &= 0 + 0 + \cos(90 - \xi) \cos(\phi) &= \cos(90 - \xi) \cos(\phi) \\
v_2 &= 0 + \sin(\phi) + 0 &= \sin(\phi) \\
v_3 &= 0 + 0 + \cos(\xi) \cos(\phi) &= \cos(\xi) \cos(\phi)
\end{aligned}$$

[00140] e assim, a Equação (15) se torna,

$$\mathbf{a} = \cos(90 - \xi) \cos(\phi) \mathbf{i} + \sin(\phi) \mathbf{j} + \cos(\xi) \cos(\phi) \mathbf{k} \quad (21)$$

[00141] O ângulo de chegada, α , entre este vetor unitário, \mathbf{a} , e o vetor de direção unitário para o eixo geométrico z , \mathbf{k} , pode ser obtido pela combinação de duas formas equivalentes para o produto escalar de vetores na Equação (17) e (18), produzindo:

$$\begin{aligned}
\mathbf{a} \cdot \mathbf{k} &= |\mathbf{a}| |\mathbf{k}| \cos(\alpha) = \cos(\alpha) \\
&= 0 + 0 + \cos(\xi) \cos(\phi) = \cos(\xi) \cos(\phi) \quad (22).
\end{aligned}$$

[00142] Aqui, a primeira linha está de acordo com a definição de vetores unitários, onde $|\mathbf{a}| = 1 = |\mathbf{k}|$, e a segunda linha está de acordo com a forma de \mathbf{a} dada na Equação (21). A Equação (22) irá produzir o verdadeiro ângulo de chegada α .

[00143] A Figura 7 é um fluxograma ilustrando uma concretização da invenção para determinar um ângulo de chegada quando existem inclinações geológicas perpendiculares à linha da fonte até o receptor. A Figura 6 ilustra em mais detalhes uma parte da invenção discutida no bloco 33 da Figura 3.

[00144] No bloco 71, um ângulo de inclinação ξ é determinado para eventos de reflexão em um traço sísmico. O ângulo de inclinação ξ é determinado a partir de outra análise de velocidade de coleta de disparo comum na área de levantamento onde a linha \mathbf{a} a partir de sua localização de ponto de disparo até esta localização do receptor é aproximadamente perpendicular.

[00145] No bloco 72, um tempo de gravação t é calculado para os eventos de reflexão em relação ao traço sísmico. O tempo de gravação t aqui no bloco 72 e o ângulo de chegada parcial $\phi(t)$ abaixo no bloco 73, podem ser obtidos a partir do procedimento descrito com

respeito à discussão dos fluxogramas na Figura 5 ou 6, dependendo se a inclinação geológica é menor ou maior do que 10° , respectivamente.

[00146] No bloco 73, um ângulo de chegada parcial $\phi(t)$ é calculado para o tempo de gravação t a partir do bloco 72. O tempo de gravação t acima no bloco 72 e o ângulo de chegada parcial $\phi(t)$ aqui no bloco 73, podem ser obtidos a partir do procedimento descrito com respeito à discussão dos fluxogramas na Figura 5 ou 6, dependendo se a inclinação geológica é menor ou maior do que 10° , respectivamente.

[00147] No bloco 74, um ângulo de chegada verdadeiro α é determinado a partir do ângulo de inclinação ξ a partir do bloco 71 e do ângulo de chegada parcial $\phi(t)$ a partir do bloco 72. Em uma concretização particular, o ângulo de chegada α é calculado a partir da Equação (22) como:

$$\alpha = \arccos[\cos(\xi)\cos(\phi(t))].$$

[00148] No bloco 75, o processo retorna para o bloco 48 da Figura 4 com o ângulo de chegada α calculado no bloco 74. Adicionar a inclinação geológica como uma variável digitalizada para o algoritmo de análise de velocidade de coleta de disparo comum produz resultados mais precisos em áreas de levantamento com inclinação geológica significativa. Entretanto, não fazer isto ainda produz traços de velocidade de partícula corrigidos que são mais precisos do que aplicar um método tal como, por exemplo, de Vaage *et al.*, no domínio (f, k_x) quando existe um deslocamento apreciável na direção (transversal) entre os receptores e o ponto de disparo com relação ao deslocamento na direção (alinhada) ao longo dos cabos sísmicos rebocáveis. Utilizar uma velocidade de empilhamento padrão ou campo de velocidade DMO, enquanto ainda menos preciso, também irá resultar em resultados aperfeiçoados nestas situações de geometria do receptor de disparo.

[00149] Deve ser entendido que o dito anteriormente é meramente uma descrição detalhada de concretizações específicas desta invenção e que várias alterações, modificações e alternativas para as concretizações descritas podem ser feitas de acordo com a presente descrição sem afastamento do escopo da invenção. Portanto, a descrição precedente não é pretendida para limitar o escopo da invenção. Ao invés disso, o escopo da invenção é para ser determinado somente pelas reivindicações anexas e por seus equivalentes.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para combinar sinais de pressão e de velocidade vertical de partícula em cabos sísmicos rebocáveis de duplo sensor **caracterizado pelo fato de que** compreende as etapas de:

gerar (11) um sinal combinado de velocidade de partícula combinando um sinal de velocidade vertical de partícula gravado, dimensionado em uma faixa de frequências superiores utilizando um ângulo de chegada dependente do tempo como determinado pela análise de velocidade, com um sinal simulado de velocidade de partícula, calculado em uma faixa de frequências inferiores a partir de um sinal de pressão gravado utilizando um filtro variável no tempo baseado no ângulo de chegada dependente do tempo; e

gerar (12) sinais combinados de pressão e de velocidade vertical de partícula combinando a pressão gravada e os sinais combinados de velocidade de partícula.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a etapa de gerar um sinal combinado de velocidade de partícula compreende as etapas de:

gravar (21) sinais de pressão $h(t)$ e sinais de velocidade vertical de partícula $g(t)$ em uma estação receptora no cabo sísmico rebocável;

transformar (22) temporariamente os sinais de pressão gravados $h(t)$ e os sinais de velocidade vertical de partícula $g(t)$ a partir do domínio de tempo para $H(\omega)$ e $G(\omega)$, respectivamente, para o domínio de frequência;

selecionar (23) um conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$;

executar as etapas a seguir para cada ângulo de chegada do conjunto selecionado de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$:

selecionar (24) um ângulo de chegada ϕ_j a partir do conjunto de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$;

calcular (25) um sinal de velocidade de partícula em uma faixa de frequências inferiores a partir do sinal de pressão transformado $H(\omega)$ para o ângulo de chegada selecionado ϕ_j , desse modo gerando um sinal simulado de velocidade de partícula $G_j^{\text{calc}}(\omega)$ na faixa de frequências inferiores;

dimensionar (26) o sinal de velocidade vertical de partícula transformado $G(\omega)$ em uma faixa de frequências superiores para o ângulo de chegada selecionado ϕ_j , desse modo gerando um sinal de velocidade vertical de partícula dimensionado $G_j^{\text{scal}}(\omega)$ na faixa de frequências superiores;

combinar (27) o sinal de velocidade de partícula simulado $G_j^{\text{calc}}(\omega)$ a partir da faixa de frequências inferiores com o sinal de velocidade vertical de partícula dimensionado $G_j^{\text{scal}}(\omega)$ a partir da faixa de frequências superiores para gerar um sinal combinado de velocidade de partícula $G_j^{\text{merg}}(\omega)$, para o ângulo de chegada selecionado ϕ_j ; e

fazer (28) a transformada inversa do sinal combinado de velocidade de partícula $G_j^{\text{merg}}(\omega)$ a partir do domínio de frequência para $g_j^{\text{merg}}(t)$ para o domínio do tempo.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a transformada temporal é uma transformada temporal de Fourier.

4. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** o conjunto de ângulos de chegada compreende o conjunto de ângulos $\phi_j = 0^0, 1^0, 2^0, \dots, 60^0$ graus para $j = 0, 1, 2, \dots, 60$, respectivamente.

5. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a etapa de dimensionar (26) compreende dividir o sinal de velocidade vertical de partícula transformado $G(\omega)$ na faixa de frequências superiores pelo cosseno do ângulo de chegada selecionado ϕ_j , gerando um sinal de velocidade vertical de partícula dimensio-

nado $G_j^{scal}(\omega)$.

6. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** uma combinação da faixa de frequências inferiores com a faixa de frequências superiores possui a mesma largura de banda que a largura de banda do sinal de pressão gravado $h(t)$.

7. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a etapa de calcular (25) um sinal de velocidade de partícula

$G_j^{calc}(\omega)$ em uma faixa de baixas frequências a partir de um sinal de pressão gravado $H(\omega)$ para o ângulo de chegada selecionado ϕ_j compreende aplicar a seguinte equação:

$$G_j^{calc}(\omega) = \frac{1 + Z_j}{1 - Z_j} H(\omega),$$

para $j = 0, 1, 2, \dots, 60$, em que ω é a frequência radial em raios/segundos igual a $2\pi f$ para a frequência temporal f e Z_j é um operador de retardo de tempo.

8. Método, de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo fato de que** o operador de retardo de tempo Z_j é dado pela equação:

$$Z_j = \exp[-i\omega\tau_j] = \cos(\omega\tau_j) - i\sin(\omega\tau_j),$$

para $j = 0, 1, 2, \dots, 60$, em que τ_j é o retardo de tempo da reflexão fantasma.

9. Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de que** o retardo de tempo da reflexão fantasma τ é dado por:

$$\tau_j = \cos(\phi_j) \frac{2D}{c},$$

para $j = 0, 1, 2, \dots, 60$, em que ϕ_j é o ângulo de chegada, D é a profundidade do receptor e c é a velocidade do som no meio.

10. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** a etapa de gerar (12) sinais combinados de pressão e de velocidade vertical de partícula compreende as etapas de:

extrair (31) um traço sísmico a partir dos sinais de pressão $h(t)$ e dos sinais de velocidade vertical de partícula $h(t)$;

extrair (32) uma amostra de tempo em um tempo de gravação t a partir do traço sísmico;

calcular (33) um ângulo de chegada $\phi(t)$ no tempo de gravação t na amostra de tempo a partir do traço sísmico, pela análise de velocidade;

determinar (34) qual ângulo de chegada ϕ_j do conjunto selecionado de ângulos de chegada $\{\phi_j\}$ está mais próximo do ângulo de chegada calculado $\phi(t)$; e

combinar (35) uma amostra de tempo do sinal de pressão gravado $h(t)$ com uma amostra de tempo do sinal de velocidade de partícula combinado correspondente $g_j^{\text{merg}}(t)$ que corresponde ao ângulo de chegada mais próximo ϕ_j .

11. Método, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de que** a etapa de calcular (33) um ângulo de chegada $\phi(t)$ no tempo de gravação t na amostra de tempo compreende aplicar a seguinte equação:

$$\phi(t) = \arcsin\left(\frac{c}{v_{app}(t)}\right),$$

em que c é a velocidade do som no meio e $v_{app}(t)$ é a velocidade aparente.

12. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de que** velocidade aparente $v_{app}(t)$ para o tempo de gravação t é calculado a partir da seguinte equação:

$$v_{app}(t) = \left(\frac{t}{x} \right) v(t_0)^2$$

em que x é o deslocamento da fonte até o receptor e $v(t_0)$ é um par de velocidade de tempo de deslocamento zero t_0 .

13. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de que** o tempo de gravação t é calculado a partir da seguinte equação:

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x}{v(t_0)^2}}.$$

14. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de que** a velocidade aparente $v_{app}(t)$ para o tempo de gravação t é calculado a partir da seguinte equação:

$$v_{app}(t) = \frac{t v(t_0)^2}{x - t_0 v(t_0) \sin(\xi)},$$

para um conjunto de velocidade $v(t_0)$, tempo de deslocamento zero t_0 e ângulo de inclinação ξ , e em que x é o deslocamento da fonte até o receptor.

15. Método, de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** o tempo de gravação t é calculado a partir da seguinte equação:

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v(t_0)^2} - \frac{t_0 2x \sin(\xi)}{v(t_0)}}.$$

16. Método, de acordo com a reivindicação 15, **caracterizado pelo fato de que** um ângulo de chegada α é calculado a partir da seguinte equação:

$$\alpha = \arccos[\cos(\xi) \cos(\phi)].$$

17. Método, de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** o ângulo de inclinação ξ é determinado a partir de outra análise de velocidade de coleta de disparo comum na área de

levantamento em que a linha a partir de sua localização de ponto de disparo até esta localização do receptor é perpendicular.

18. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** os sinais de velocidade vertical de partícula são obtidos utilizando acelerômetros.

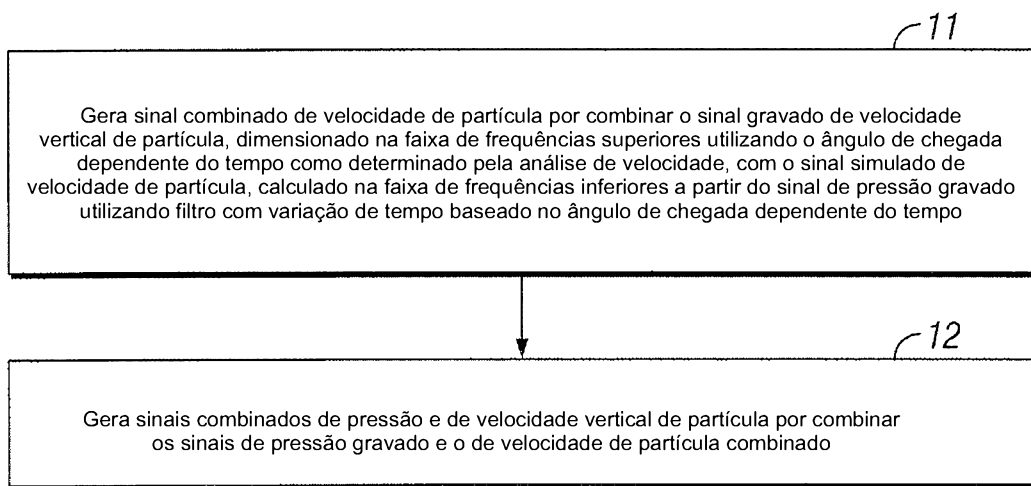


FIG. 1

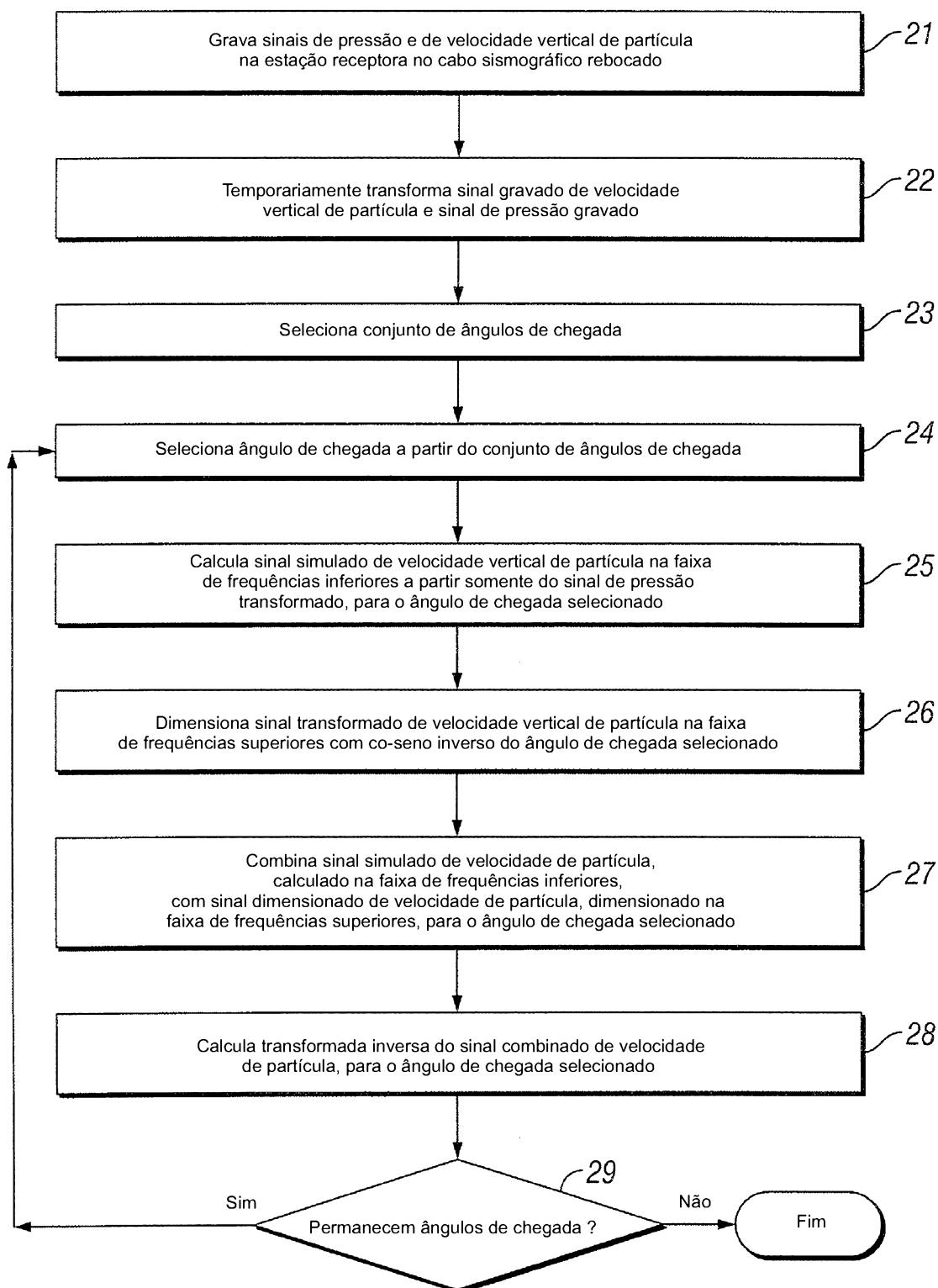


FIG. 2

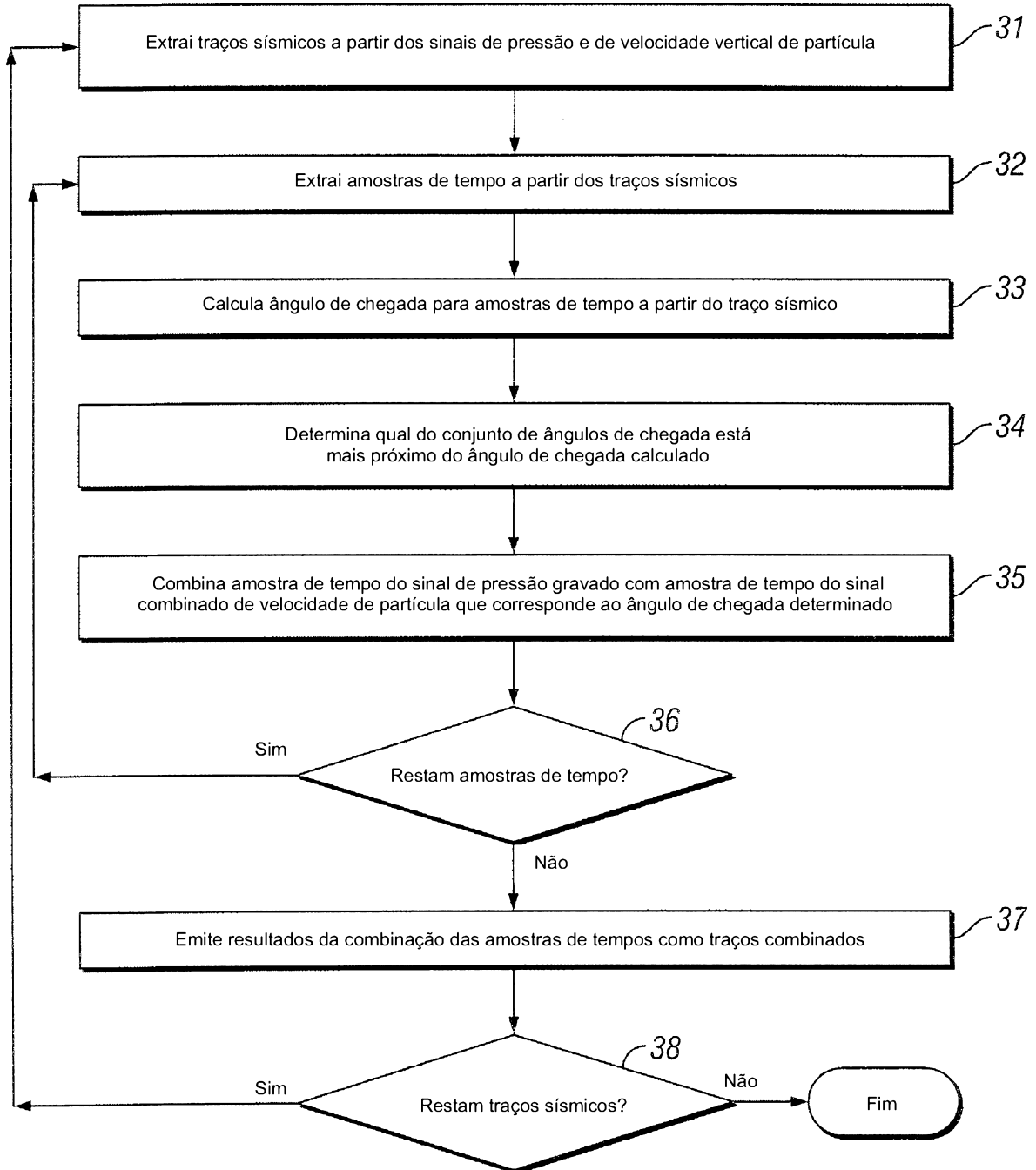


FIG. 3

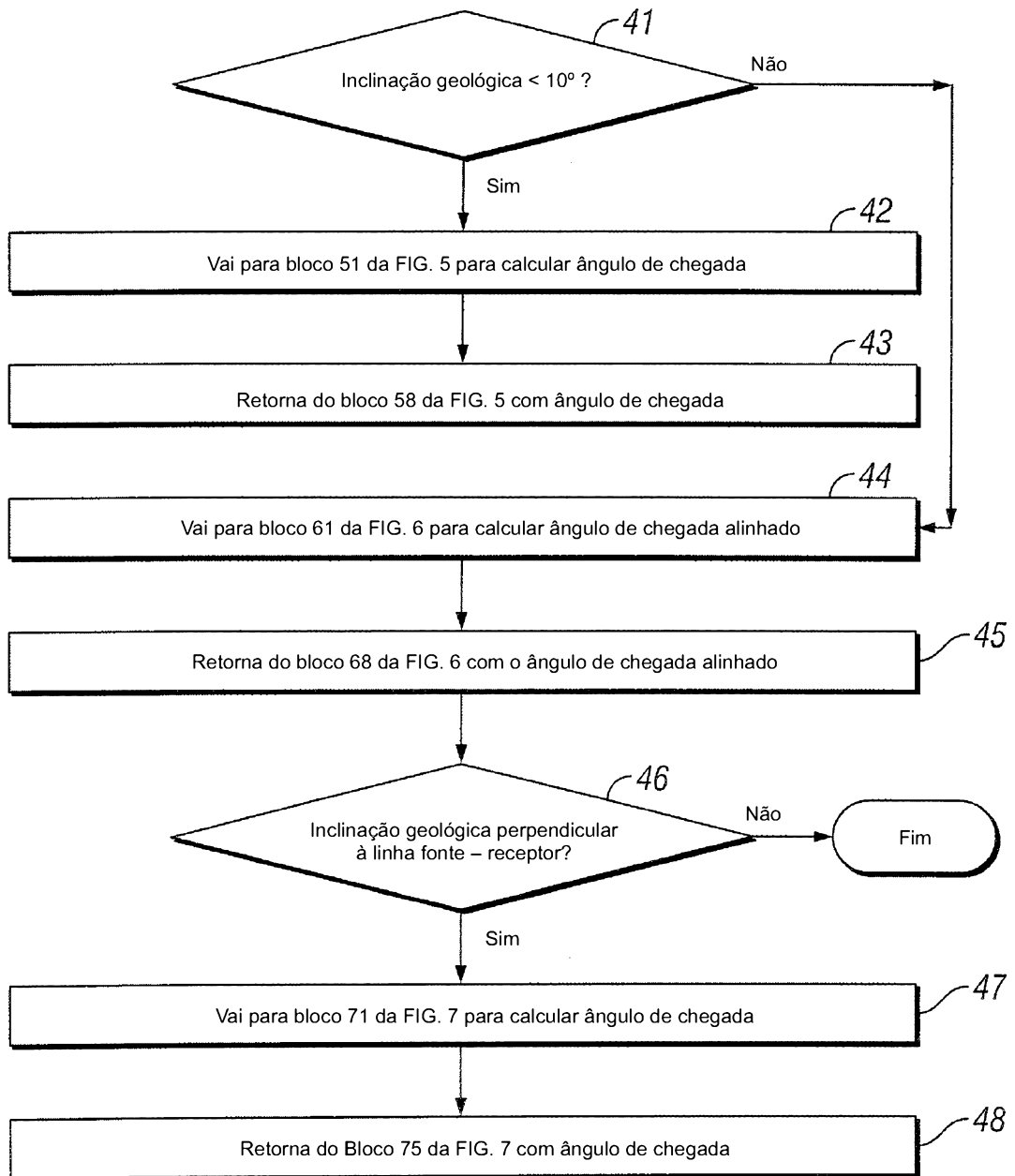


FIG. 4

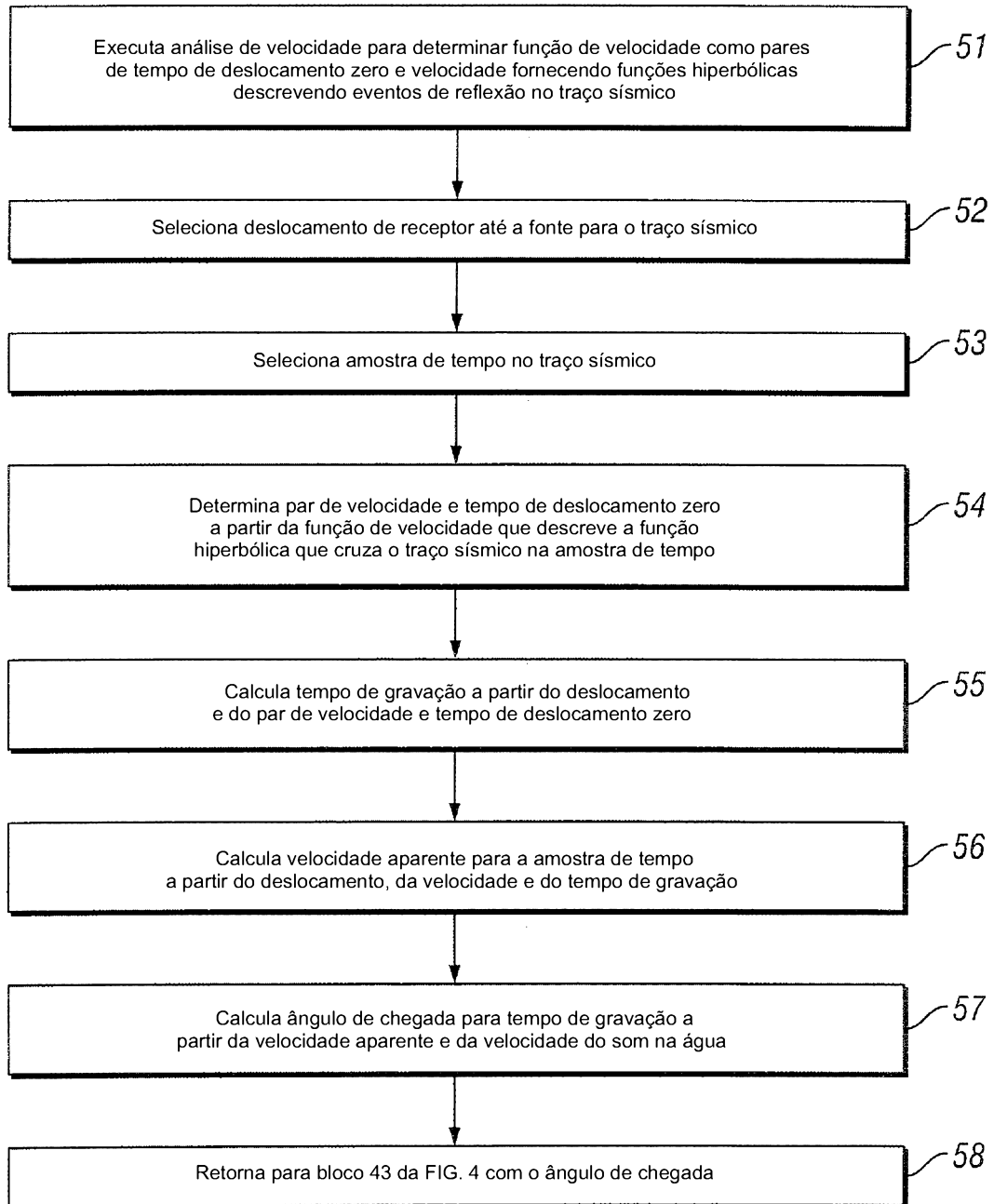


FIG. 5

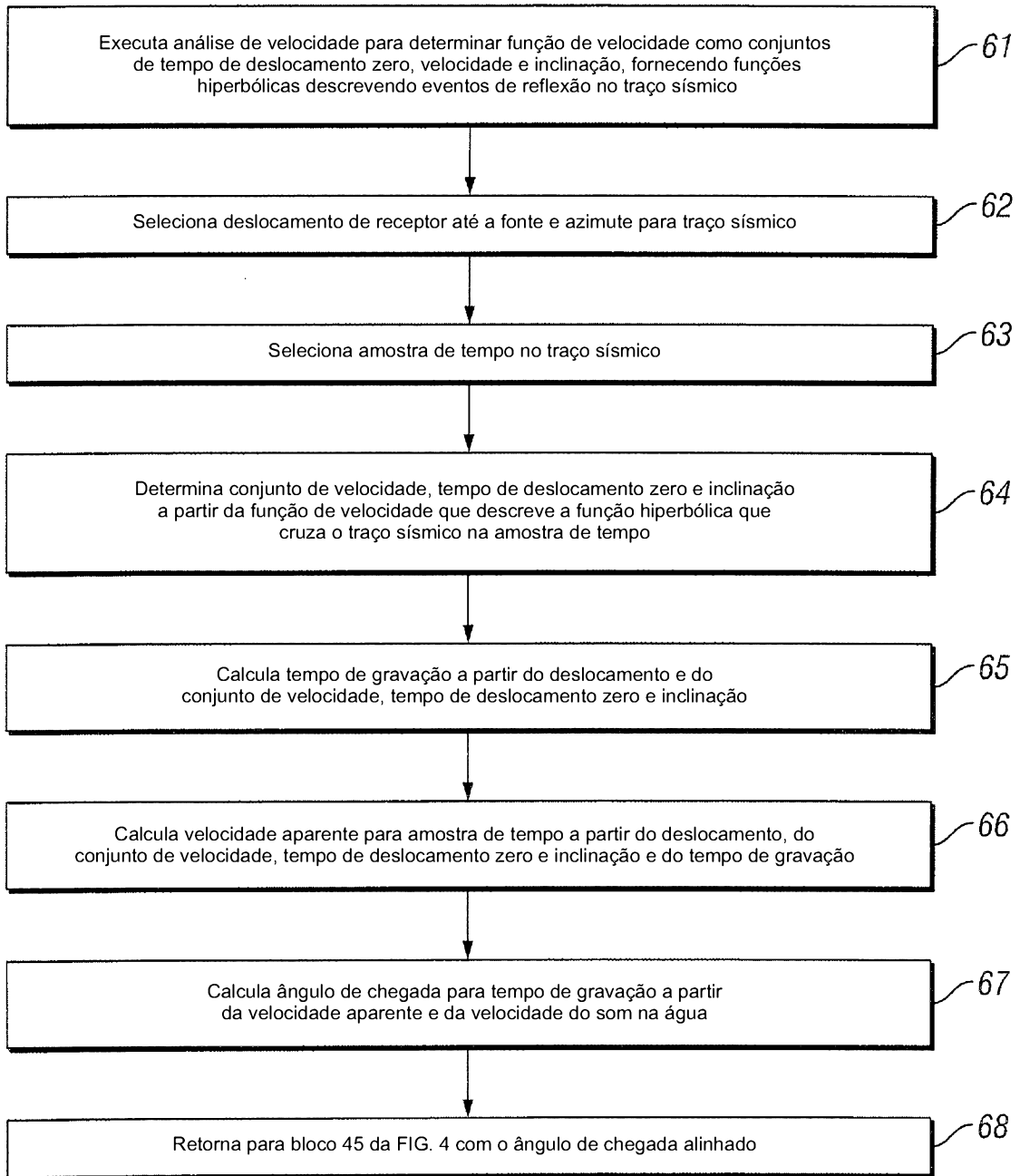


FIG. 6



FIG. 7

8/13

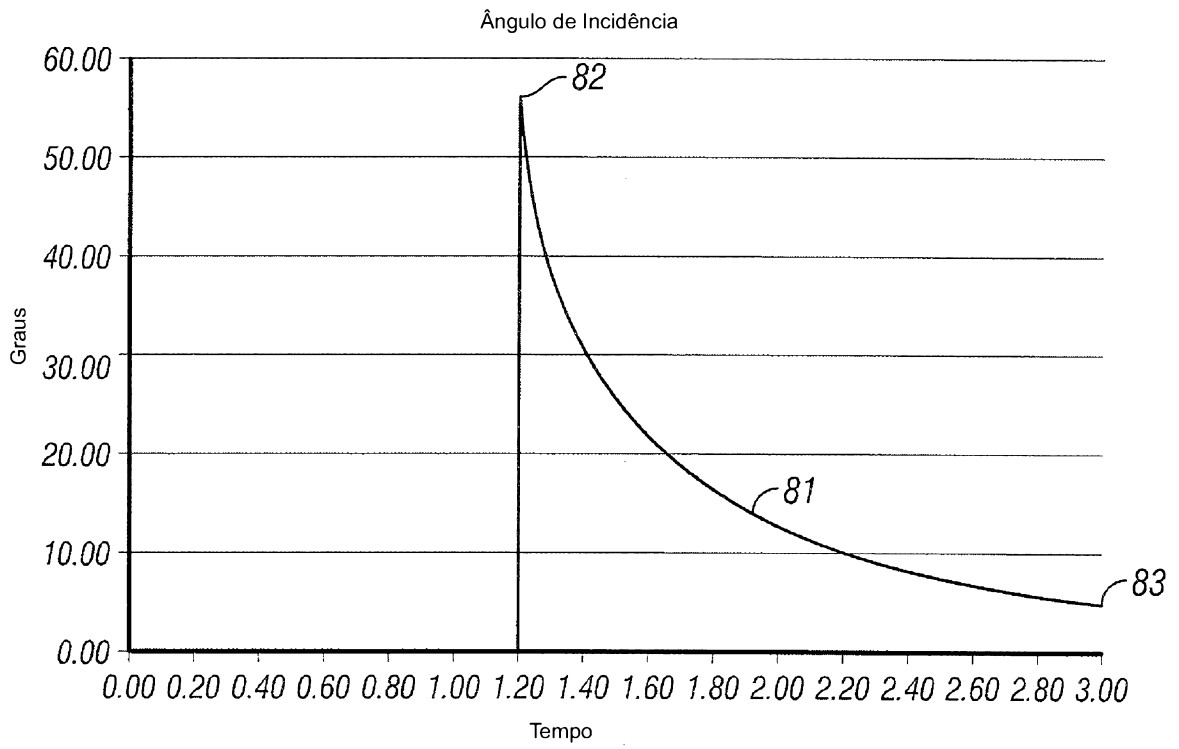


FIG. 8

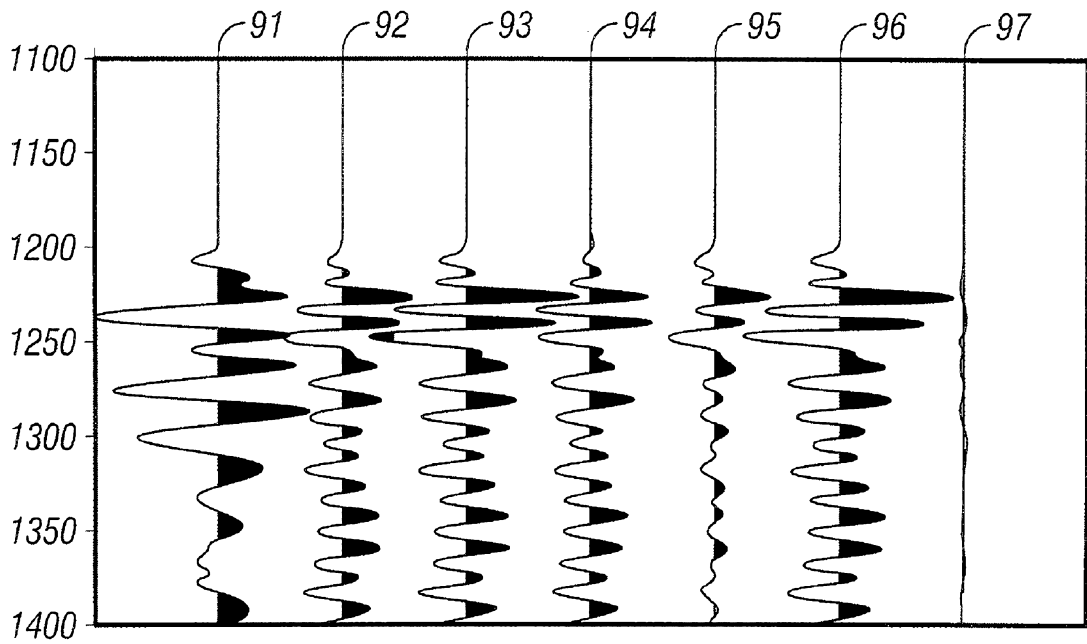


FIG. 9

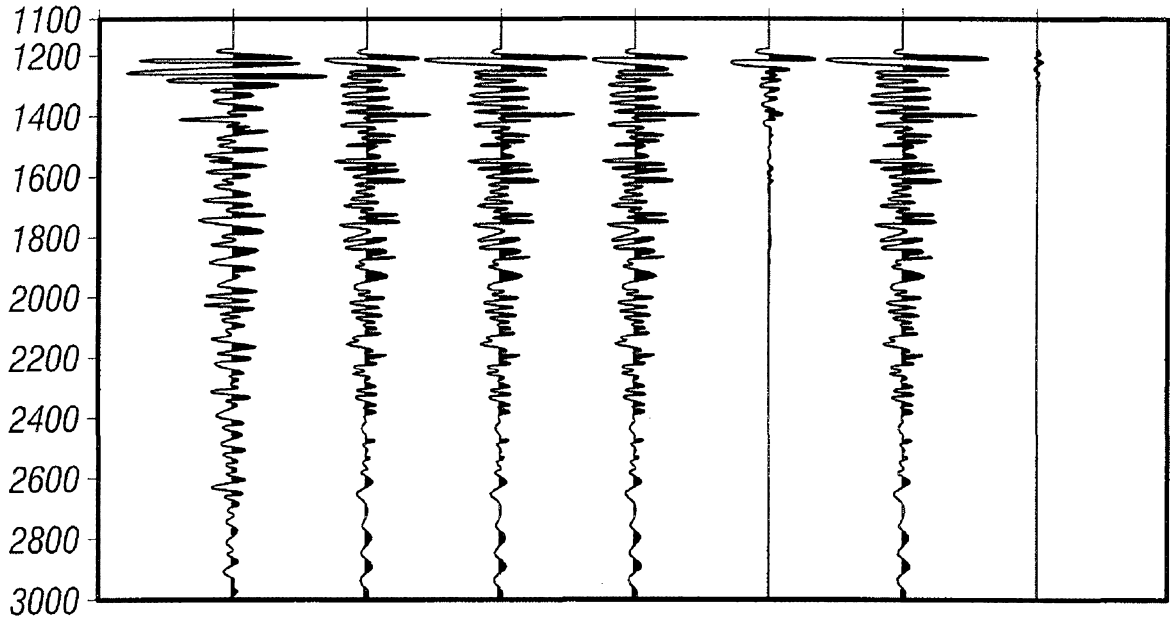


FIG. 10

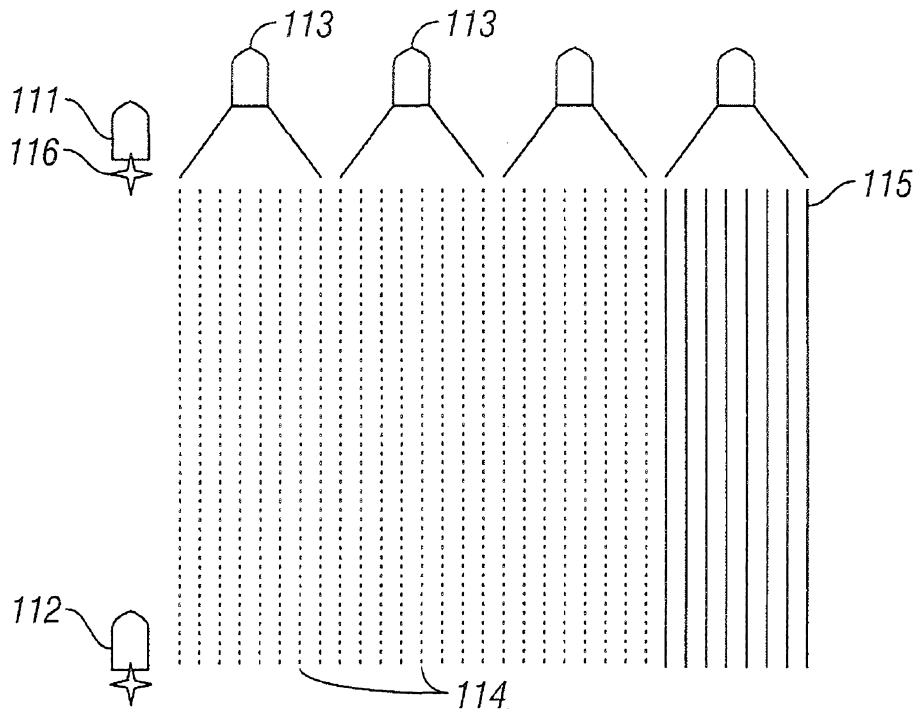


FIG. 11

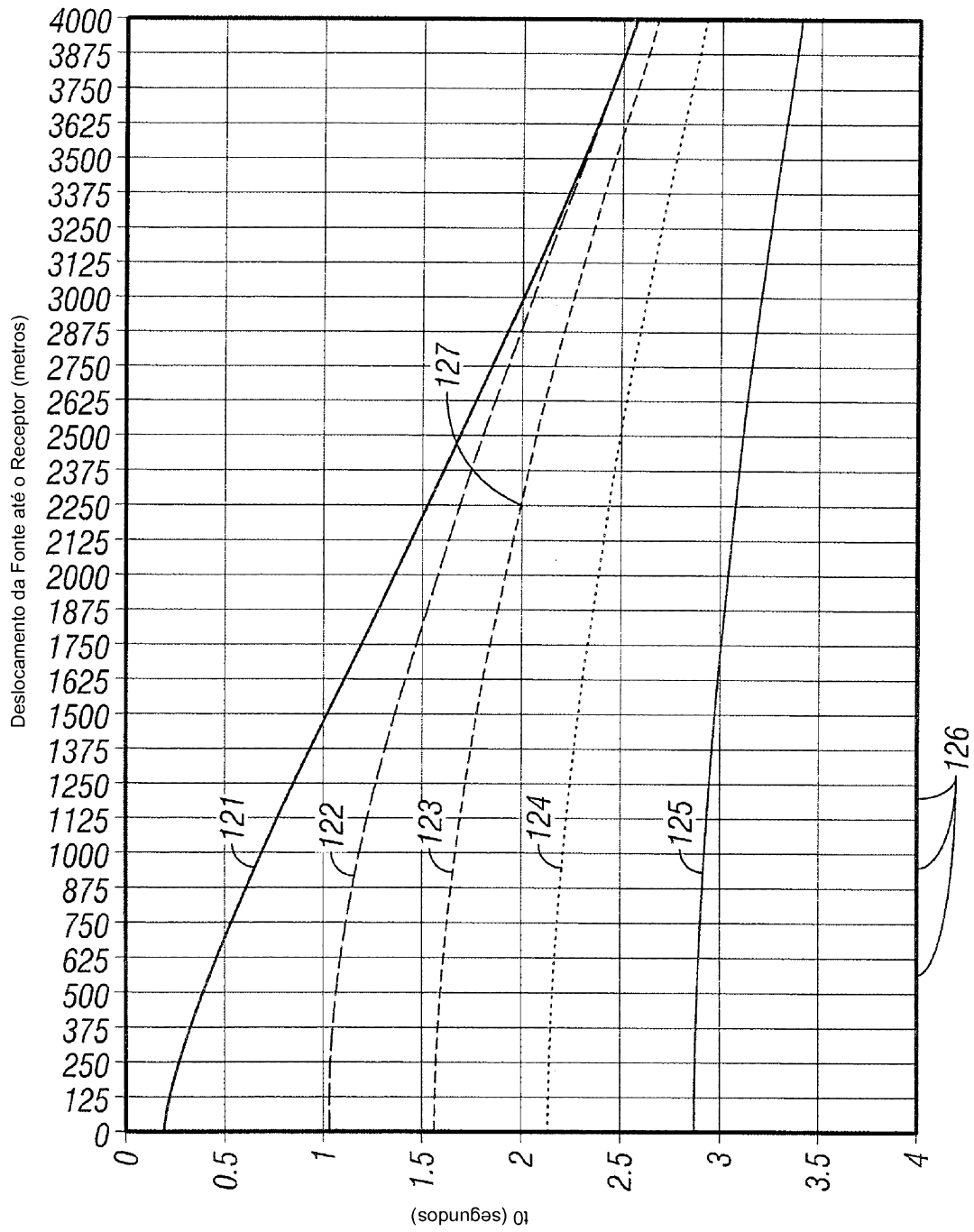


FIG. 12

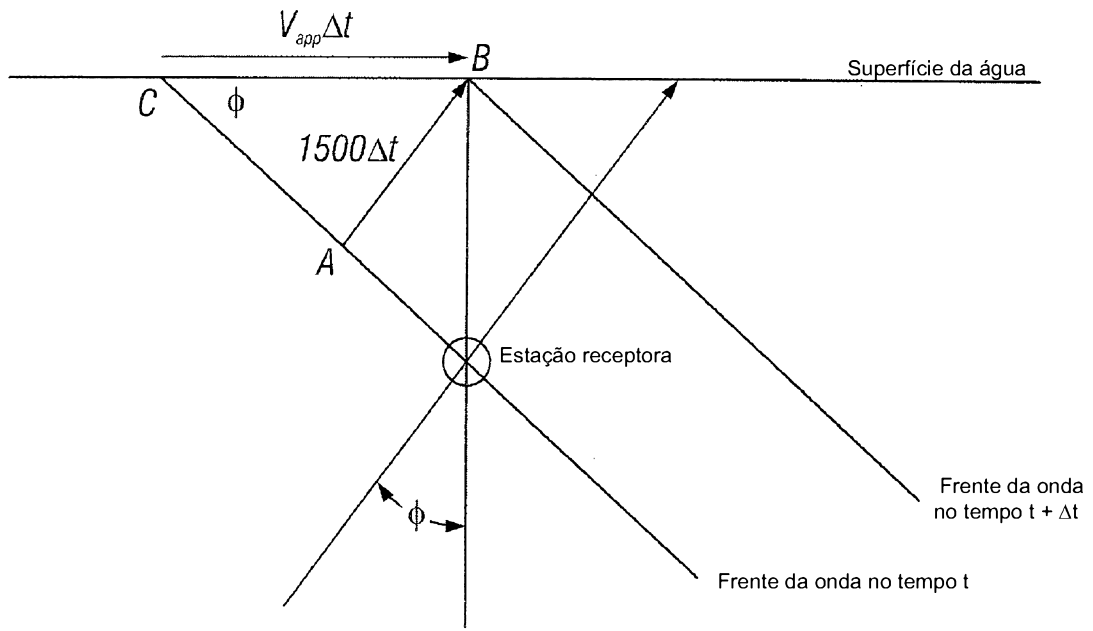


FIG. 13

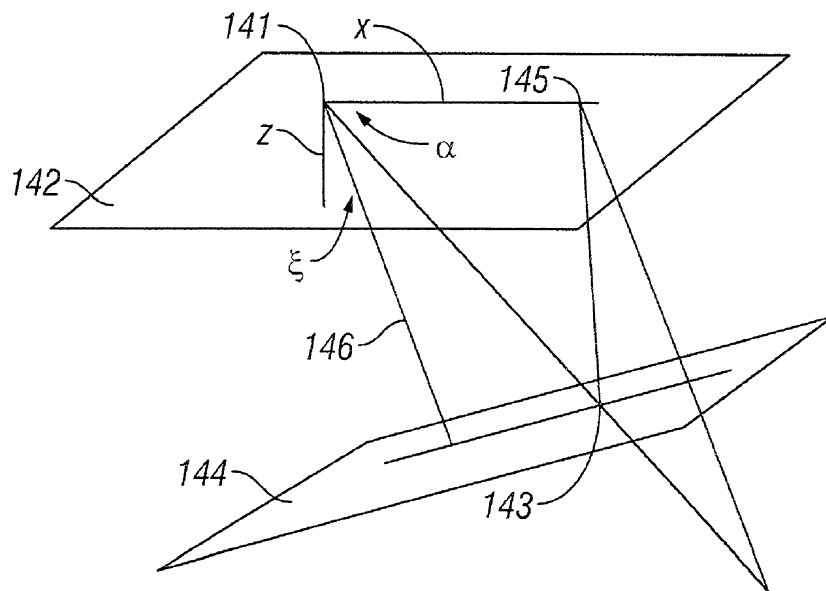


FIG. 14

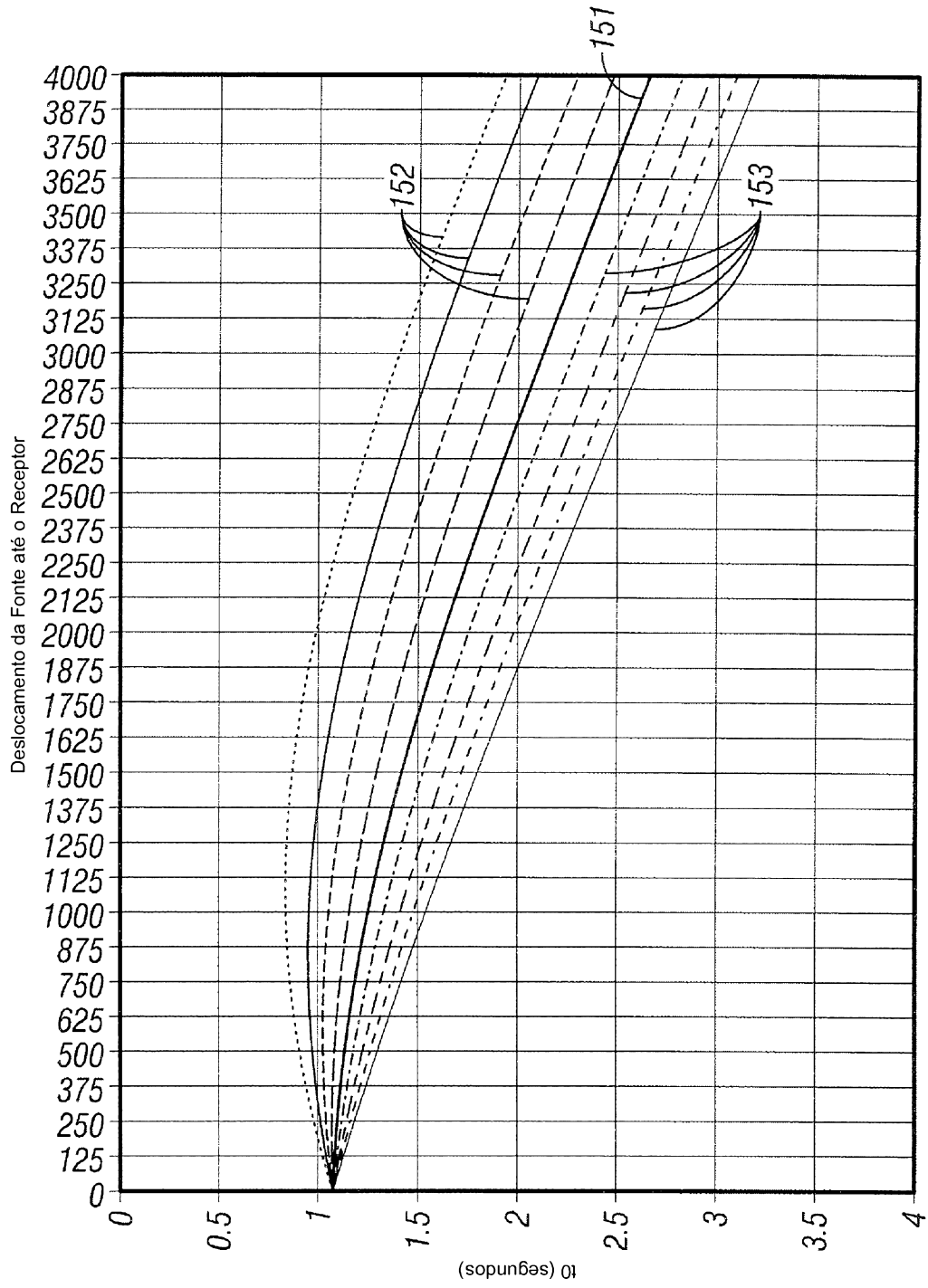


FIG. 15

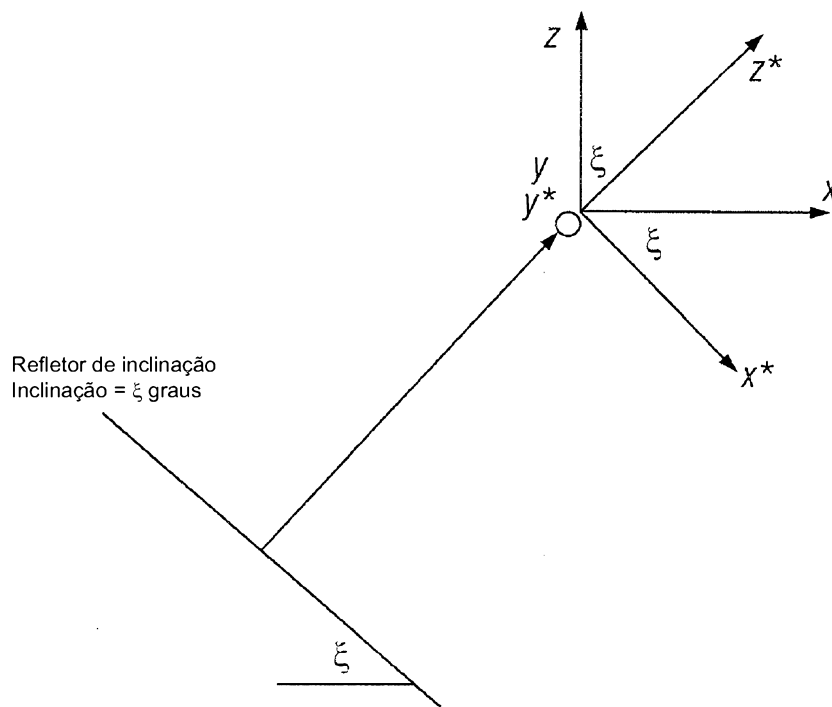


FIG. 16