

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 001 558**

51 Int. Cl.:

G01V 1/00 (2014.01)

G01V 1/38 (2006.01)

G01V 1/047 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.09.2014** **PCT/US2014/055772**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.04.2015** **WO15047784**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.09.2014** **E 14783698 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2024** **EP 3049831**

54 Título: **Sistema y procedimiento para realizar estudios sísmicos con una fuente controlada utilizando barridos de máxima energía**

30 Prioridad:

27.09.2013 US 201361883437 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

05.03.2025

73 Titular/es:

BP CORPORATION NORTH AMERICA INC.
(100.00%)
501 Westlake Park Boulevard
Houston, TX 77079, US

72 Inventor/es:

DELLINGER, JOSEPH ANTHONY y
HARPER, MARK FRANCIS LUCIEN

74 Agente/Representante:

PONTI & PARTNERS, S.L.P.

ES 3 001 558 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistema y procedimiento para realizar estudios sísmicos con una fuente controlada utilizando barridos de máxima energía

REFERENCIA CRUZADA A SOLICITUDES RELACIONADAS

[0001] Esta solicitud reivindica la prioridad bajo 35 USC § 119(e)(1) de la solicitud de patente provisional de EE. UU. anterior con N.º de serie 61/883.437, presentada el 27 de septiembre de 2013.

CAMPO TÉCNICO

[0002] Esta descripción se refiere al tema general de la exploración y vigilancia sísmica y, en particular, a los procedimientos para adquirir señales sísmicas y de otro tipo que sean representativas de la subsuperficie para fines de exploración y/o vigilancia sísmica.

ANTECEDENTES

[0003] Un estudio sísmico representa un intento de obtener imágenes o mapear la subsuperficie de la tierra mediante el envío de energía sonora hacia abajo en el suelo y el registro de los "ecos" que regresan de las capas de roca abajo. La fuente de la energía sonora descendente podría provenir, por ejemplo, de explosiones o vibradores sísmicos en tierra, o de cañones de aire en ambientes marinos. Durante un estudio sísmico, la fuente de energía se coloca en varias ubicaciones cerca de la superficie de la tierra por encima de una estructura geológica de interés. Cada vez que la fuente se activa, genera una señal sísmica que viaja hacia abajo a través de la tierra. Los "ecos" de esa señal se registran a continuación en muchas ubicaciones en la superficie. A continuación, se realizan múltiples combinaciones de fuente/registro para crear un perfil casi continuo de la subsuperficie que se puede extender por muchas millas. En un estudio sísmico bidimensional (2D), las ubicaciones de registro generalmente se disponen a lo largo de una sola línea, mientras que, en un estudio tridimensional (3D), las ubicaciones de registro se distribuyen por la superficie en un patrón de cuadrícula. En términos más simples, se puede considerar que una línea sísmica 2D proporciona una imagen en sección transversal (corte vertical) de las capas de la tierra tal como existen directamente debajo de las ubicaciones de registro. Un estudio 3D produce un "cubo" o volumen de datos que es, al menos conceptualmente, una imagen 3D de la subsuperficie que se encuentra debajo del área del estudio. Sin embargo, en realidad, tanto los estudios 2D como los 3D interrogan algún volumen de tierra que se encuentra debajo del área cubierta por el estudio. Finalmente, un estudio 4D (o de lapso) es aquel que se registra sobre la misma área en dos o más momentos diferentes. Obviamente, si se comparan imágenes sucesivas de la subsuperficie, los cambios que se observan (asumiendo que se contabilizarán las diferencias en la firma de origen, receptores, registradores, condiciones de ruido ambiental, etc.,) serán atribuibles a los cambios en la subsuperficie.

[0004] Un estudio sísmico está compuesto por una gran cantidad de registros o trazas sísmicas individuales. Las muestras digitales en trazas de datos sísmicos generalmente se adquieren en intervalos de 0,002 segundos (2 milisegundos o "ms"), aunque también son comunes los intervalos de muestreo de 4 milisegundos y 1 milisegundo. Longitudes de traza típicas cuando se usan fuentes impulsivas convencionales son de 5 a 16 segundos, lo que corresponde a 2500 - 8000 muestras en un intervalo de 2 milisegundos. Si se utiliza una fuente no impulsiva, se debe tener en cuenta el tiempo de activación prolongado de la fuente, por lo que las longitudes de traza generalmente serán más largas. Convencionalmente, cada traza registra una activación de fuente sísmica, por lo que hay una traza por cada activación del receptor de ubicación de fuente en vivo. En algunos casos, múltiples fuentes físicas pueden activarse simultáneamente, pero la señal de fuente compuesta se denominará como una "fuente" en esta invención, ya sea generada por una o por muchas fuentes físicas.

[0005] En un estudio típico en 2D, generalmente habrá varias decenas de miles de trazas, mientras que en un estudio en 3D el número de trazas individuales puede llegar a múltiples millones de trazas.

[0006] Aunque hay una serie de fuentes sísmicas disponibles, las fuentes controlables se han utilizado durante muchos años para obtener datos sísmicos terrestres y marinos para su uso en la exploración, la evaluación de yacimientos, etc. Para los fines de la presente descripción, el término "fuente controlable" se utilizará para referirse a una fuente sísmica acústica que irradia sonido como una señal de barrido de frecuencia, cuyo perfil de frecuencia contra el tiempo después del inicio del barrido es controlable y continuo, y cuyas limitaciones físicas imponen un límite a la amplitud de su salida que normalmente variará con la frecuencia.

[0007] Fuentes controlables pueden usarse en circunstancias donde se desea explorar un entorno a través de su respuesta acústica. Por ejemplo, en la exploración sísmológica, las señales se irradian hacia el suelo y los ecos que regresan a la superficie se registran y se utilizan para investigar la geología del subsuelo para identificar posibles ubicaciones de yacimientos de petróleo y gas. Fuentes controlables incluyen, solo a modo de ejemplo, fuentes de vibración en tierra y en el mar, resonadores marinos, etc. La información general relacionada con los resonadores marinos se puede encontrar, por ejemplo, en la solicitud de patente estadounidense Ser. Nos. 12/980.527 y

12/995.763.

[0008] En tales circunstancias, es deseable controlar la forma del espectro de la señal acústica transmitida por la fuente. Por lo general, también es deseable maximizar la salida de energía acústica de la fuente, que estará limitada por sus capacidades físicas. La salida de energía se puede maximizar, por supuesto, simplemente ejecutando la fuente al nivel de salida máximo que es capaz de hacer. En general, sin embargo, este nivel variará fuertemente con la frecuencia, de modo que si el dispositivo se barre en frecuencia a una velocidad constante, producirá un espectro cuya forma, o variación en la magnitud relativa con la frecuencia (en lo sucesivo, su "perfil de frecuencia") está dictado por las limitaciones físicas de la fuente y puede no ser óptimo para la aplicación. Por ejemplo, la salida de una fuente de pistón a bajas frecuencias está limitada por su carrera de pistón y es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, mientras que para los fines de la exploración sísmica normalmente es deseable tener un espectro plano o aproximadamente plano. En la medida en que el espectro no es plano, aparecen distorsiones en las imágenes del subsuelo que pueden ser difíciles o imposibles de eliminar.

[0009] Por lo tanto, lo que se necesita es una forma de generar una señal sísmica con una fuente controlable de modo que dicha señal tenga propiedades de frecuencia que se hayan elegido para producir mejores imágenes del subsuelo, y para usar la fuente controlable de una manera máximamente eficiente mientras lo hace.

[0010] Cabe señalar que los intentos de la técnica anterior para hacer esto se han centrado únicamente en el desplazamiento del pistón como un parámetro limitante a bajas frecuencias, y recurren a barridos lineales tradicionales para frecuencias más altas, cuya estrategia ha demostrado ser insatisfactoria en muchos casos.

[0011] Como es bien conocido en las técnicas de adquisición y procesamiento sísmico, se ha necesitado un sistema y un procedimiento que proporcione una mejor manera de adquirir datos sísmicos de banda ancha (por ejemplo, aproximadamente 1 - 80 Hz). En consecuencia, ahora debe reconocerse, como reconocieron los inventores actuales, que existe, y ha existido desde hace algún tiempo, una necesidad muy real de un procedimiento de procesamiento de datos sísmicos que aborde y resuelva los problemas descritos anteriormente.

[0012] Sin embargo, antes de proceder a una descripción, debe notarse y recordarse que la descripción que sigue, junto con los dibujos que la acompañan, no debe interpretarse como una limitación de las enseñanzas de este documento a los ejemplos (o realizaciones) mostrados y descritos. Esto es así porque los expertos en la técnica a la que pertenece la invención podrán idear otras formas de esta invención dentro del ámbito de las reivindicaciones adjuntas. El documento GB2495801 describe un procedimiento y un dispositivo para determinar una señal de accionamiento para fuentes marinas de vibraciones sísmicas. Tiene en cuenta las curvas de límite para el desplazamiento, la velocidad, la corriente y el voltaje para generar una curva de límite de aceleración compuesta, el área bajo la cual es representativa de un intervalo de funcionamiento disponible del elemento de fuente vibroacústica.

[0013] El documento US2013/201789 describe un procedimiento de control de límites vibratorios sísmicos a bajas frecuencias. El documento US2011/085416 describe un sistema y un procedimiento para determinar un barrido de frecuencia para un análisis sísmico. El documento US2007/133354 describe sistemas y procedimientos para mejorar el contenido de baja frecuencia en la adquisición de vibraciones sísmicas. El documento US2011/162906 describe una fuente sísmica marina. El documento WO2014/076076 describe un dispositivo y procedimiento para la adquisición continua de datos.

RESUMEN

[0014] Las realizaciones de la invención se describen en las reivindicaciones independientes y las características preferidas se describen en las reivindicaciones dependientes.

[0015] Según un aspecto, se proporciona un sistema y procedimiento de exploración sísmica que permite obtener imágenes de estructuras subsuperficiales utilizando fuentes sísmicas controlables que son superiores a las disponibles anteriormente.

[0016] Un ejemplo fuera del alcance de la invención comprende un procedimiento de exploración sísmica sobre una región de la subsuperficie de la tierra que contiene características estructurales o estratigráficas conducentes a la presencia, migración o acumulación de hidrocarburos, comprendiendo el procedimiento: seleccionar una fuente controlable; seleccionar una pluralidad de parámetros característicos de dicha fuente controlable; determinar curvas límite para cada uno de dicha pluralidad seleccionada de parámetros según la frecuencia; usar dichas curvas límite determinadas para obtener una curva de restricción para dicha fuente controlable; usar dicha curva de restricción para obtener una señal de barrido para dicha fuente controlable; y, usar dicha señal de barrido junto con dicha fuente controlable para recopilar datos sísmicos próximos a una región de la subsuperficie de la tierra.

[0017] Otro ejemplo fuera del alcance de la invención comprende un procedimiento de exploración sísmica sobre una región de la subsuperficie de la tierra que contiene características estructurales o estratigráficas conducentes a la presencia, migración o acumulación de hidrocarburos, comprendiendo el procedimiento: seleccionar

una fuente sísmica, comprendiendo dicha fuente sísmica un pistón para generar una señal de frecuencia de barrido controlable; determinar al menos un desplazamiento máximo del pistón, una velocidad máxima del pistón y una aceleración máxima del pistón; usar dicho desplazamiento máximo del pistón para calcular una curva de límite de desplazamiento; utilizar dicha aceleración máxima del pistón para calcular una curva de límite de aceleración; usar
5 dicha velocidad máxima del pistón para calcular una curva de límite de velocidad; utilizar dicha curva límite de desplazamiento, dicha curva límite de velocidad y dicha curva límite de aceleración para determinar una curva límite restringida; usar dicha curva límite restringida para diseñar un programa de barrido para dicha fuente sísmica; y, usar dicho programa de barrido para recoger datos sísmicos próximos a dicha región de la subsuperficie de la tierra, explorando de ese modo dentro de dicha región de la subsuperficie de la tierra.

[0018] Una fuente sísmica de frecuencia de barrido controlable fuera del alcance de la invención comprende: un alojamiento; un pistón dentro de dicho alojamiento, dicho pistón al menos para generar una señal sísmica de frecuencia de barrido; y, un controlador en comunicación electrónica con dicho pistón, donde dicho controlador contiene un programa de barrido para mover dicho pistón dentro de dicho alojamiento para generar dicha señal sísmica
15 de frecuencia de barrido, donde dicho programa de barrido se determina mediante un procedimiento que comprende: determinar para dicho pistón al menos un valor máximo de desplazamiento del pistón, un valor máximo de velocidad del pistón y un valor máximo de aceleración del pistón; usar dicho valor máximo de desplazamiento del pistón para calcular una curva límite de desplazamiento; usar dicho valor máximo de velocidad del pistón para calcular una curva de límite de velocidad; usar dicho valor máximo de aceleración del pistón para calcular una curva de límite de aceleración; utilizar dicha curva límite de desplazamiento, dicha curva límite de velocidad y dicha curva límite de aceleración para determinar una curva límite restringida; y, usar dicha curva de límite restringido para diseñar dicho programa de barrido para dicha fuente sísmica.

[0019] Otro ejemplo fuera del alcance de la invención comprende un procedimiento de exploración sísmica sobre una región de la subsuperficie de la tierra que contiene características estructurales o estratigráficas conducentes a la presencia, migración o acumulación de hidrocarburos, comprendiendo el procedimiento: seleccionar una fuente sísmica, comprendiendo dicha fuente sísmica un pistón para generar una señal de frecuencia de barrido controlable; determinar al menos dos de un desplazamiento máximo del pistón, una velocidad máxima del pistón, una aceleración máxima del pistón y una sacudida máxima del pistón; para cada uno de dichos al menos dos
25 desplazamientos máximos determinados de dicho pistón, dicha velocidad máxima del pistón, dicha aceleración máxima del pistón y dicha sacudida máxima del pistón, calcular una curva límite correspondiente; utilizar dichas curvas límite correspondientes para determinar una curva límite restringida; usar dicha curva límite restringida para diseñar un programa de barrido para dicha fuente sísmica; y, usar dicho programa de barrido para recoger datos sísmicos próximos a dicha región de la subsuperficie de la tierra, explorando de ese modo dentro de dicha región de la subsuperficie de la tierra.

[0020] Un ejemplo adicional fuera del alcance de la invención comprende un procedimiento de exploración sísmica de una diana subsuperficial, comprendiendo el procedimiento: acceder a una pluralidad de trazas sísmicas recogidas próximas a dicha diana subsuperficial, donde dicha pluralidad de trazas sísmicas se adquieren mediante un
40 procedimiento de recogida que comprende: seleccionar una fuente sísmica, comprendiendo dicha fuente sísmica un pistón para generar una señal de frecuencia de barrido controlable; determinar al menos dos de un desplazamiento máximo del pistón, una velocidad máxima del pistón, una aceleración máxima del pistón y una sacudida máxima del pistón; para cada uno de dichos al menos dos desplazamientos máximos determinados del pistón, dicha velocidad máxima del pistón, dicha aceleración máxima del pistón y dicha sacudida máxima del pistón, calcular una curva límite correspondiente; utilizar dichas curvas límite correspondientes para determinar una curva límite restringida; usar dicha curva límite restringida para diseñar un programa de barrido para dicha fuente sísmica; usar dicho programa de barrido para recoger dicha pluralidad de trazas sísmicas próximas a dicha diana subsuperficial; y, usar al menos una porción de dicha pluralidad accedida de trazas sísmicas procesadas para explorar en busca de hidrocarburos próximos a dicha diana subsuperficial.

[0021] Otras realizaciones y variaciones son ciertamente posibles dentro del alcance de la presente descripción y pueden ser formuladas fácilmente por los expertos en la materia basándose en la descripción en esta invención.

[0022] Lo anterior ha esbozado en términos generales las características más importantes de la invención que se describe en esta solicitud, de modo que la descripción detallada que sigue pueda entenderse más claramente, y para que la contribución de los presentes inventores a la técnica pueda apreciarse mejor. La presente invención no debe limitarse en su aplicación a los detalles de la construcción y a las disposiciones de los componentes establecidos en la descripción siguiente o ilustrados en los dibujos. Más bien, la invención es capaz de otras realizaciones y de practicarse y llevarse a cabo de varias otras maneras no enumeradas específicamente en esta invención. Por último,
60 debe entenderse que la fraseología y la terminología empleadas en esta solicitud tienen por objeto la descripción y no deben considerarse limitantes, a menos que la memoria descriptiva limite específicamente la invención.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0023] Otros objetos y ventajas se harán evidentes al leer la siguiente descripción detallada y hacer referencia

a los dibujos, donde:

- La Figura 1 ilustra un entorno general de adquisición y procesamiento sísmico.
- La Figura 2 contiene una secuencia de procesamiento de ejemplo del tipo que podría utilizarse en esta invención.
- 5 La Figura 3 ilustra un entorno marino de ejemplo.
- La Figura 4 contiene un esquema de una realización de hardware.
- La Figura 5 contiene una ilustración de una lógica de funcionamiento.
- La Figura 6 ilustra cómo pueden funcionar múltiples restricciones físicas para limitar el movimiento del pistón en varios intervalos de frecuencia en una caja de resonador marino.
- 10 La Figura 7 ilustra una configuración de ejemplo de un dispositivo que sería adecuado para el control según los procedimientos enseñados en esta invención.
- La Figura 8 ilustra restricciones en la velocidad de la placa de tierra para el ejemplo de la Figura 7 para restricciones de impedancia interna.
- La Figura 9 ilustra el perfil de frecuencia de un barrido calculado para el dispositivo de la Figura 7.
- 15 La Figura 10 ilustra la velocidad máxima de la placa base según tiempo según el ejemplo de la Figura 7.
- La Figura 11 ilustra un barrido óptimo calculado según una variación del dispositivo de la Figura 7.
- La Figura 12 ilustra el espectro de fuerza en el pistón para el dispositivo de la Figura 7.
- La Figura 13 contiene una ilustración de un ejemplo de una fuente de doble extremo.
- La Figura 14 ilustra restricciones en la aceleración de volumen para la realización de la Figura 13.
- 20 La Figura 15 ilustra el perfil de frecuencia de un barrido óptimo de 3 a 16 Hz determinado según una realización (frecuencia contra tiempo).
- La Figura 16 contiene una ilustración de la presión a 1 metro contra el tiempo de 3 a 16 Hz para el barrido óptimo en lo que respecta al ejemplo de la Figura 13.
- La Figura 17 ilustra un espectro de presión de campo lejano para el ejemplo de la Figura 13 mostrado en comparación con un nivel de espectro diana deseado.
- 25

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0024] Si bien esta invención es susceptible de realización en muchas formas diferentes, se muestran en los dibujos, y se describirán a continuación en esta invención en detalle, algunas realizaciones específicas de la presente invención. Sin embargo, se debe entender que la presente descripción se debe considerar una ejemplificación de los principios de la invención, y no pretende limitar la invención a las realizaciones o algoritmos específicos así descritos.

[0025] Un aspecto de la presente descripción enseña un procedimiento para obtener un espectro de energía de señal de salida de un perfil de frecuencia deseado a partir de una fuente de sonido controlable de modo que se maximice la salida de energía de la fuente. El perfil de frecuencia deseado puede ser constante dentro de la banda de frecuencia transmitida, o puede variar con la frecuencia, por ejemplo, para mantener una relación señal-ruido constante dado un espectro de ruido de fondo medido que varía con la frecuencia, o para contrarrestar el efecto de la señal de la fuente que se refleja en la superficie del mar (la llamada "fuente fantasma"). El presente procedimiento no requiere que la salida de energía de la fuente se reduzca por debajo de su capacidad máxima, lo que implica que para una fuente de sonido controlable dada se puede producir una amplitud de espectro de energía diana dada acumulada en un solo barrido de fuente que tiene la duración de barrido mínima posible, o alternativamente, se puede producir un perfil de frecuencia diana dado que tiene la amplitud máxima alcanzable para una duración de barrido permitida dada.

[0026] Según otro aspecto, se proporciona un procedimiento para determinar un perfil de barrido óptimo (frecuencia de barrido según tiempo desde el inicio del barrido) para un resonador marino utilizando una interrelación entre el perfil de frecuencia de salida deseado, el desplazamiento máximo del pistón del resonador, la velocidad máxima, la aceleración y, opcionalmente, la sacudida (es decir, la derivada de la aceleración) del mismo, junto con el número de segundos en el barrido. Según los procedimientos enseñados en esta solicitud, estos parámetros se pueden usar para determinar un perfil de barrido efectivo para un resonador particular para producir un espectro de salida del perfil de frecuencia deseado que tenga una amplitud máxima para un tiempo de barrido dado, o para producir un espectro de salida diana durante un tiempo de barrido mínimo.

[0027] El procedimiento en una realización se basa en la característica de una señal de frecuencia de barrido de que su espectro de energía a una frecuencia dada es proporcional al cuadrado de su amplitud en el momento en que pasa a través de la frecuencia dada, e inversamente proporcional a su tasa de cambio de frecuencia en ese momento, siempre que las tasas de cambio de amplitud y fase de la señal sean bajas en comparación con la frecuencia de la señal. En resumen, en una realización, el procedimiento consiste en ajustar la tasa de cambio de la frecuencia de la señal de barrido emitida por la fuente de sonido controlable en proporción al cuadrado de su amplitud máxima a esa frecuencia, y en proporción inversa al perfil de frecuencia deseado del espectro de energía de la señal. Por lo tanto, se puede hacer que el espectro de energía de la salida de la fuente controlable tenga una forma que coincida con el perfil de frecuencia diana deseado. De manera alternativa, el espectro de energía de la salida de la fuente controlable acumulada en un solo barrido se puede hacer igual a un espectro de amplitud diana deseado, y se puede determinar la duración mínima de barrido requerida para lograr este espectro de amplitud diana. La tasa de cambio de la frecuencia que logra esto generalmente variará con la frecuencia y, por lo tanto, con el tiempo después del inicio

del barrido.

[0028] Este procedimiento tenderá a producir resultados más precisos cuando las tasas de cambio de la frecuencia y la envolvente de la amplitud sean relativamente pequeñas. Es decir, sería mejor si la tasa de cambio de la frecuencia, dividida por la frecuencia, fuera pequeña en comparación con la frecuencia angular; y la tasa de cambio de la envolvente de la amplitud, dividida por la envolvente de la amplitud, también debe ser pequeña en comparación con la frecuencia angular. En términos generales, cualquier forma de onda que pueda describirse razonablemente como un barrido de frecuencia satisfará al menos aproximadamente estas condiciones.

10 REALIZACIONES

[0029] Según una realización, se proporciona un sistema y un procedimiento para mejorar las imágenes derivadas de datos sísmicos (tanto de transmisión como de reflexión) mejorando la calidad de la señal fuente que se genera a partir de una fuente controlable.

[0030] Esta descripción enseña un procedimiento de obtención de un espectro de energía de señal de un perfil de frecuencia deseado a partir de una fuente de sonido controlable. El perfil de frecuencia deseado puede ser constante dentro de la banda de frecuencia transmitida, o puede variar con la frecuencia, por ejemplo, para mantener una relación señal-ruido constante dado un espectro de ruido de fondo medido que varía con la frecuencia, o para producir un espectro de campo lejano plano teniendo en cuenta el efecto de filtrado de la reflexión de la señal fuente por la superficie del mar en el caso de una fuente marina. En una realización, el presente procedimiento no requiere que la salida de energía de la fuente se reduzca por debajo de su capacidad máxima.

[0031] Una variación del presente procedimiento toma como punto de partida la constatación de que el espectro de energía de una señal de barrido de frecuencia a una frecuencia dada es proporcional al cuadrado de su amplitud en el momento en que pasa a través de la frecuencia dada, e inversamente proporcional a su tasa de cambio de frecuencia en ese momento. En resumen, en una realización, el procedimiento consiste en ajustar la tasa de cambio de frecuencia de la señal de barrido emitida por la fuente de sonido controlable en proporción al cuadrado de su amplitud máxima a esa frecuencia y en proporción inversa al perfil de frecuencia deseado del espectro de energía de señal (la magnitud al cuadrado de su transformada de Fourier). Por lo tanto, el perfil de frecuencia del espectro de energía de su salida se puede igualar al perfil deseado. La tasa de cambio de la frecuencia que logra esto generalmente variará con la frecuencia y, por lo tanto, con el tiempo después del inicio del barrido.

[0032] Por lo tanto, si la amplitud a cualquier frecuencia está limitada por la fuente física, a continuación, el espectro de energía de salida se puede configurar manipulando la tasa a la que cambia la frecuencia de barrido. En particular, se puede producir un espectro de salida plano a pesar de múltiples restricciones físicas que limitan la salida máxima de la fuente de manera diferente a diferentes frecuencias. También se puede ajustar para compensar los efectos de propagación fuera de la fuente.

[0033] La amplitud máxima de la señal de la fuente generalmente estará determinada por diferentes aspectos físicos de la fuente a diferentes frecuencias; para fuentes de pistón a las frecuencias más bajas, por ejemplo, generalmente se define por la carrera máxima permitida del pistón, y a frecuencias algo más altas por la velocidad máxima permitida del pistón.

[0034] El procedimiento puede aplicarse en contextos donde diferentes aspectos del mecanismo de origen dan lugar a diferentes restricciones en diferentes partes del espectro de frecuencias. Por ejemplo, una fuente de pistón solo será capaz de una carrera finita, aunque solo sea por la longitud finita de la fuente de sonido, y generalmente su carrera será mucho más pequeña que la longitud de la fuente. Algunas de las derivadas de tiempo del desplazamiento del pistón también estarán sujetas a restricciones. Con respecto a la velocidad del pistón, la primera derivada del desplazamiento con respecto al tiempo, este parámetro generalmente estará limitado físicamente por la velocidad a la que los sellos del pistón pueden absorber la energía de fricción sin daños. La aceleración del pistón (la segunda derivada del desplazamiento) normalmente estará limitada por la fuerza máxima que la fuente puede suministrar para accionar el pistón. La sacudida (tasa de cambio de aceleración) puede estar limitada por la pérdida de energía a la radiación acústica. Se aplican restricciones análogas a las fuentes que no son de pistón.

[0035] Estas múltiples restricciones en conjunto definen un nivel de fuente máximo general según la frecuencia. Dada esta función, que se determinará a partir de las propiedades del dispositivo, el procedimiento descrito se puede aplicar como se describió anteriormente para crear un patrón de barrido que produzca un espectro de frecuencia de salida deseado en el tiempo mínimo factible para una fuente controlable dada. Alternativamente, se puede usar para crear un espectro con un perfil de frecuencia deseado que tenga la máxima amplitud posible para un tiempo de barrido dado.

[0036] Una ventaja de la estrategia instantánea es que la fuente puede funcionar a o cerca de la energía de salida máxima y aún producir un espectro con el perfil de frecuencia preferido. Por lo tanto, la energía de salida y la utilidad de la señal de salida se pueden maximizar matemáticamente de forma simultánea. La energía acústica total

del barrido está controlada por el tiempo permitido para completar el barrido. En algunas realizaciones, el dispositivo puede barrer durante un período de tiempo y a continuación hacer una pausa antes de comenzar el siguiente barrido. En otras realizaciones, el dispositivo puede emitir sonido continuamente y el "tiempo permitido para completar el barrido" puede elegirse a intervalos convenientemente espaciados en el tiempo. Por ejemplo, el dispositivo podría barrer hacia arriba, a continuación hacia abajo, luego hacia arriba, etc., y los "barridos individuales" podrían definirse para comenzar y terminar en los puntos de inflexión de la frecuencia.

[0037] Los procedimientos enseñados en esta invención se pueden usar de diversas maneras. En su forma más simple, para un espectro de salida deseado dado, y un conjunto dado de restricciones como funciones de frecuencia, el procedimiento encuentra el barrido más corto posible que produce el espectro de salida especificado. Para un espectro con un perfil de frecuencia dado, cuanto mayor sea la amplitud general del espectro de salida y, por lo tanto, cuanto mayor sea la energía total requerida en el barrido de salida, mayor será el barrido que se requerirá.

[0038] A menudo, el tiempo de barrido total es limitado. Por ejemplo, para una fuente marina que está siendo remolcada por un buque en movimiento con una velocidad dada, es posible que el barrido deba completarse antes de que se alcance el siguiente "punto de disparo". El tiempo que tarda el buque en mover la distancia entre puntos de disparo adyacentes a continuación limita el tiempo de barrido máximo permitido. En tales casos, puede ser deseable obtener una señal con un perfil de frecuencia de espectro preferido que tenga la amplitud máxima para la duración de barrido total especificada. En este caso, en otra realización, el procedimiento se puede usar de forma iterativa para encontrar la amplitud máxima posible del espectro de señal de salida compatible con las capacidades físicas de la fuente y correspondiente a un barrido de la duración deseada. En general, la duración del barrido variará en proporción a la magnitud general del espectro de energía de señal deseado.

[0039] De manera similar, en otra realización, el procedimiento puede usarse mediante aplicación iterativa para determinar la velocidad máxima del buque compatible con la producción de un barrido de salida de la amplitud deseada para una fuente dada.

[0040] El procedimiento también se puede utilizar para corregir la variación con la frecuencia de la transmisión de la señal a través del entorno. Por ejemplo, la señal transmitida al subsuelo por una fuente sísmica marina se modifica por el reflejo "fantasma" de su señal desde la superficie del mar. Esta modificación se puede corregir mediante una aplicación del procedimiento descrito donde el perfil de frecuencia deseado se divide por la modificación no deseada. Esto producirá un espectro de señal de campo lejano con el perfil deseado.

[0041] Téngase en cuenta, sin embargo, que la consideración de diseño limita el barrido a rangos de frecuencia donde el fantasma de superficie no produce la extinción total o la casi extinción de la señal transmitida. Es bien sabido que dichos intervalos de frecuencia se pueden ajustar para incluir el intervalo de frecuencia deseado de la señal de fuente haciendo funcionar la fuente a una profundidad adecuada debajo de la superficie del mar.

[0042] Si las restricciones físicas de una fuente marina varían con su profundidad de operación, en otra realización, el procedimiento puede calcularse iterativamente para un intervalo de profundidades (y, por lo tanto, restricciones) para encontrar la profundidad de operación óptima para la fuente para un espectro de salida de campo lejano deseado dado. Son posibles una amplia variedad de aplicaciones del procedimiento para el diseño de estudios.

[0043] El procedimiento también se puede utilizar como una herramienta de diseño mediante la construcción de un modelo dinámico de una fuente controlable propuesta que incluye todos los aspectos del diseño que pueden afectar su salida. El modelo se utiliza para estimar la amplitud de salida máxima de la fuente según la frecuencia. A continuación, el procedimiento se puede usar para predecir la longitud mínima de barrido que se requerirá para producir un espectro de salida deseado, y se puede usar además para estimar el impacto de los cambios de diseño en la longitud de barrido para llegar a un diseño que produzca el espectro deseado con un barrido no más largo que un tiempo especificado.

[0044] Si se prefiere, el procedimiento podría usarse junto con mediciones experimentales de la salida máxima de la fuente según la frecuencia en lugar de con estimaciones basadas en un modelo dinámico. Todo lo que se requeriría para usar los procedimientos enseñados en esta invención es una estimación confiable de la salida máxima de la fuente según la frecuencia, independientemente de cómo se derive, y un espectro de energía de salida deseado. En algunas realizaciones, la salida máxima podría ser una función tanto de la frecuencia como del tiempo, por ejemplo, si el dispositivo necesita ser estrangulado periódicamente para permitir que el calor se disipe. Siempre que la salida máxima cambie solo lentamente en comparación con la duración de un solo barrido, a continuación el procedimiento instantáneo aún se puede aplicar y producirá resultados útiles, pero deberá volver a aplicarse de vez en cuando para volver a calcular el barrido óptimo a medida que cambia la salida máxima. Si el procedimiento instantáneo se aplica en los casos en que la salida máxima está cambiando más rápidamente que esto, a continuación los barridos calculados estarán menos cerca de ser óptimos. En algunas realizaciones, el dispositivo podría tener sensores que ajustarían dinámicamente la salida máxima en tiempo real, y la tasa de barrido se calcularía en tiempo real según valor determinado actualmente de la salida máxima.

[0045] Volviendo ahora a la Figura 1, esta figura contiene una descripción general de una realización y su entorno asociado. Como se indica, se diseñará un estudio sísmico **110** según los procedimientos bien conocidos por los expertos en la materia. El estudio podría ser, por ejemplo, un VSP (*Vertical Seismic Profile* - perfil sísmico vertical), un estudio terrestre, un estudio marino o alguna combinación. Los expertos en la materia comprenderán cómo se diseñan los estudios y, especialmente, cómo pueden realizarse cuando el objetivo es obtener imágenes de una diana subterránea en particular.

[0046] Como parte de este procedimiento, los algoritmos **140** se pondrán a disposición de una CPU **150**, que podría ser cualquier dispositivo informático programable convencional o no convencional, y se utilizarán para diseñar barridos de fuente óptimos para ser utilizados en el diseño de estudio **110**, como lo indica la flecha desde el cuadro **150** hasta el cuadro **110**. Los algoritmos enseñados en esta invención **140** pueden almacenarse en un disco duro local o remoto u otro almacenamiento.

[0047] En el campo, los datos sísmicos se recopilarán según el diseño del estudio (bloque **120**). Esto normalmente implicará posicionar la fuente y los receptores al menos aproximadamente según el diseño y registrar las activaciones de la fuente como se hace normalmente. Las ondas sísmicas registradas (es decir, los datos sísmicos) pueden (o no) someterse a algún procesamiento en el campo antes de transmitirlos a un centro de procesamiento donde normalmente se llevará a cabo la mayor parte del procesamiento.

[0048] Típicamente, dentro de un centro de procesamiento, se realizará un procesamiento inicial para asociar cada registro sísmico con una superficie u otra ubicación (bloque **130**), aunque algunos aspectos de este bloque también podrían haberse realizado en el campo. En cualquier caso, un sistema informático **150**, que podría ser una estación de trabajo, un servidor, una unidad central, un ordenador paralelo, una colección de ordenadores o estaciones de trabajo en red, etc., normalmente se dedicará a procesar los datos aún más en preparación para usarlos en la exploración.

[0049] A continuación, las activaciones de fuentes individuales se identificarán y separarán según los procedimientos bien conocidos por los expertos en la materia (por ejemplo, mediante inversión dispersa). Los algoritmos que realizan dicha separación normalmente se pondrán a disposición de un ordenador que los utilizará mediante el acceso a una cierta cantidad de disco duro local o remoto u otro almacenamiento (elemento **145**). De manera similar, se proporcionarán algoritmos adicionales útiles en el procesamiento de datos sísmicos a la CPU **150**, que podría ser cualquier dispositivo informático programable convencional o no convencional.

[0050] Convencionalmente, los datos sísmicos se procesarán y verán en una pantalla de ordenador, tal como la de una estación de trabajo **170**. La salida del procesamiento sísmico se puede usar para crear mapas o gráficos de datos sísmicos y/o atributos sísmicos **180** según los procedimientos bien conocidos por los expertos en la materia.

[0051] En muchos casos, los procedimientos enseñados en esta solicitud formarían parte del componente de diseño de estudio del bloque **110** y a continuación se implementarían cuando se realice el estudio (bloque **120**).

[0052] La Figura 2 contiene detalles adicionales de una secuencia de procesamiento sísmico típica, que consiste en la recolección de datos sísmicos **210**, edición **215**, algún tipo de procesamiento inicial **220**, acondicionamiento de la señal y obtención de imágenes **230**, producción de secciones o volúmenes fotografiados **240**, interpretación inicial de los datos sísmicos **250**, mejora adicional de la imagen consistente con los objetivos de la exploración **260**, generación de atributos a partir de los datos sísmicos procesados **270**, reinterpretación de los datos sísmicos según sea necesario **280** y, en última instancia, generación de un prospecto de perforación **290**.

[0053] Con respecto a la Figura 3, esta figura contiene una ilustración de una realización que podría ponerse en práctica durante la fase de adquisición de la exploración sísmica. En una realización, al menos un buque **310** en una masa de agua **320** remolcará uno o más resonadores sísmicos **330** (un ejemplo ilustrativo de una fuente sísmica controlable) que funcionará según los principios descritos en esta invención. En otra realización (no se muestra), el uno o más resonadores sísmicos **330** podrían ser remolcados por un vehículo submarino autónomo (AUV - *Autonomous Underwater Vehicle*). En algunas realizaciones, uno o más buques sísmicos **310** remolcarán una cierta cantidad de sensores receptores **332**. En algunas realizaciones, los receptores **335** (por ejemplo, receptores del fondo oceánico) se situarán en el lecho oceánico **325**. Dondequiera que se encuentren los receptores, en el agua **320**, en el fondo del océano **325**, en pozos debajo del fondo del océano (no se muestran), o cualquier combinación de estos, un objeto principal es obtener una imagen de la configuración de la capa del subsuelo **324**.

[0054] Pasando a continuación a una discusión de algunos aspectos teóricos, se puede demostrar que si un barrido de frecuencia consiste en una señal oscilante cuya frecuencia varía lentamente con el tiempo y es continua y cuya amplitud varía lentamente en comparación con el período de oscilación, su espectro de energía a una frecuencia dada es teóricamente igual al doble de la envolvente de amplitud de señal al cuadrado dividida por la tasa de cambio de la frecuencia angular de barrido, ambas tomadas en el momento en que el barrido pasa por la frecuencia dada. Esto generalmente se puede expresar en la siguiente ecuación:

$$|\bar{A}(\omega)|^2 = \frac{2\alpha(t_\omega)^2}{|\dot{\omega}_s(t_\omega)|}.$$

En esta ecuación $\bar{A}(\omega)$ es la transformada de Fourier de la historia temporal $A(t)$ de la señal de barrido, $\alpha(t_\omega)$ es la amplitud de la señal de barrido en el tiempo t_ω donde pasa a través de la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia, y $\omega_s(t_\omega)$ es la tasa de cambio de la frecuencia angular del barrido ω_s en el instante t_ω .

La historia temporal del barrido viene dada por:

$$A(t) = \alpha(t) \sin(\phi(t)).$$

Aquí $\phi(t)$ es una función de tiempo en continuo aumento después del inicio del barrido, cuya derivada es igual a la frecuencia de barrido $\omega_s(t)$:

$$\omega_s(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad y \quad \dot{\omega}_s(t) = \frac{d^2\phi(t)}{dt^2}.$$

[0055] La elección de la cantidad específica dada por $H(t)$, y las unidades donde se mide, dependerá del tipo de fuente. $A(t)$ debe elegirse de modo que sea proporcional a la amplitud del campo acústico observable producido por la fuente:

$$P(t) = kA(t).$$

Aquí $P(t)$ es el campo acústico irradiado y k es una constante de proporcionalidad que convierte las unidades. La ecuación para el espectro del campo acústico a continuación se puede escribir como:

$$|\bar{P}(\omega)|^2 = k^2 |\bar{A}(\omega)|^2.$$

[0056] Si bien k en esta expresión podría elegirse para usar unidades tales que $k = 1$, a menudo es más conveniente representar $A(t)$ usando unidades que corresponden a las dimensiones físicas de la fuente de sonido, y $P(t)$ en unidades estándar usadas para medir niveles de energía acústica, y manejar la conversión de unidades según sea necesario en k . El parámetro k también se podría variar según la convención que se utiliza para representar un espectro de energía: por ejemplo, los acústicos cuentan las frecuencias positivas y negativas, mientras que la convención geofísica es considerar solo la energía en las frecuencias positivas al calcular una densidad espectral de energía para una fuente sísmica. Para algunas aplicaciones, el espectro diana es un espectro de energía, que mide la energía total en un barrido (la convención habitual para los geofísicos), pero para otras aplicaciones (por ejemplo, para una fuente de emisión continua) el espectro diana es un espectro de energía, que mide la energía por unidad de tiempo (la convención habitual para los acústicos). La elección de las unidades y las convenciones utilizadas para representar el espectro diana determinarán las unidades y el valor apropiados para k , según los procedimientos bien conocidos por los expertos en la materia.

[0057] En el caso de una fuente marina de pistón móvil compacta $A(t)$ puede, por ejemplo, elegirse para que sea la aceleración de volumen de la fuente. (Una fuente compacta es aquella cuyas dimensiones físicas son pequeñas en comparación con las longitudes de onda de su salida acústica). Para una fuente de pistón móvil $V(t) = A_p x(t)$ es el volumen de agua desplazado por la fuente, donde A_p es el área de sección transversal del pistón móvil y $x(t)$ es el desplazamiento del pistón según tiempo. A continuación, $A(t)$ se elige para que sea igual a la segunda derivada del

desplazamiento de volumen con respecto al tiempo, es decir, $A(t) = \ddot{V}(t) = A_p \ddot{x}(t)$, a la que la amplitud del campo de presión acústica observable producido por la fuente a una distancia de referencia de 1 metro es proporcional, con una

$$k = \left(\frac{\rho}{4\pi} \right)$$

constante de proporcionalidad , donde ρ es la densidad del agua.

[0058] Esta es la fórmula correcta para una fuente marina compacta de pistón móvil si $|\bar{P}(\omega)|^2$ se mide utilizando unidades consistentes, por ejemplo, pascuales al cuadrado por Hertz al cuadrado a una distancia de referencia de 1 metro si se utilizan unidades SI. Si, en cambio, se usaran unidades SI para $A(t)$ pero micropascales (en lugar de pascuales) para $P(t)$, para seguir la convención de los acústicos para medir los niveles de sonido, a

$$k = 10^6 \left(\frac{\rho}{4\pi} \right)$$

continuación, k sería

para realizar la conversión de unidades deseada.

$$|\bar{A}(\omega)|^2 = (\omega^2 A_p)^2 |\bar{x}(\omega)|^2$$

[0059] Para continuar con este ejemplo, $A(\omega)$ se puede escribir como , relacionando

10 la transformada de Fourier del desplazamiento x con el espectro de salida $|\bar{A}(\omega)|^2$.

[0060] En el caso de una fuente de vibrador terrestre, $A(t)$ podría elegirse para que sea la aceleración de la placa base, nuevamente una cantidad a la que la amplitud del campo de presión acústica observable producido por la fuente a una distancia de referencia fija es proporcional. En general, la constante de proporcionalidad k dependerá del

15 tipo de fuente y de la elección de las unidades y convenciones utilizadas para representar $A(t)$ y $P(t)$.

[0061] Estas ecuaciones forman la base de la estrategia instantánea. Hasta ahora, los esfuerzos dirigidos a dar forma al espectro acústico de salida observable de un vibrador o resonador se han centrado en el desplazamiento máximo del pistón o placa base. La presente estrategia, sin embargo, proporciona una estrategia mucho más general

20 que tiene en cuenta múltiples restricciones, no solo una, lo que permite que un espectro con un perfil de frecuencia deseado se produzca de manera más eficiente de lo que ha sido posible hasta ahora.

[0062] Lo anterior significa que una vez que se ha especificado el espectro de salida deseado $|\bar{A}(\omega)|^2$, se pueden calcular las cantidades $\alpha(t)$ y $\Phi(t)$ que definen el barrido $A(t)$ que producirá el espectro de salida deseado, de una manera que se analizará a continuación.

[0063] Si no hubiera restricciones en la amplitud $\alpha(t_\omega)$ a cuyo cuadrado el espectro de salida $|\bar{A}(\omega)|^2$ es proporcional, a continuación la tasa de cambio de frecuencia $\omega_s(t_\omega)$ simplemente podría establecerse en un valor constante y $\alpha(t_\omega)$ ajustarse para obtener el valor deseado de $|\bar{A}(\omega)|^2$. Esta metodología de "barrido lineal" se usa

30 comúnmente en aplicaciones donde la fuente sísmica controlada tiene energía de sobra.

[0064] En la práctica, como se ha explicado, la fuente puede no tener energía de sobra, en cuyo caso α está limitado por la naturaleza física de la fuente y se limitará a algún valor máximo $\alpha_{\max}(\omega)$ que puede variar con la frecuencia. Si el objetivo es producir la mayor cantidad de energía posible de la fuente, intuitivamente la fuente debe

35 funcionar a la máxima energía en todo momento. La ecuación definitoria se convierte a continuación en:

$$|\bar{A}(\omega)|^2 = \frac{2\alpha_{\max}^2(\omega)}{|\dot{\omega}_s(t_\omega)|}$$

[0065] Esta ecuación se puede invertir para obtener un requisito sobre la frecuencia de barrido:

40

$$|\dot{\omega}_s(t_\omega)| = \frac{2\alpha_{\max}^2(\omega)}{|\bar{A}(\omega)|^2}$$

Si el objetivo es determinar el tiempo de barrido mínimo requerido para lograr un espectro acústico observable dado

$$|\bar{P}(\omega)|^2$$

(con una amplitud específica, no solo un perfil de frecuencia específico), es necesario volver a formular la ecuación anterior en términos del espectro de energía de la señal acústica observable utilizando la constante de proporcionalidad k previamente introducida. La ecuación para $\dot{\omega}(t)$ se puede a continuación volver a emitir en una forma que la relacione directamente con el espectro acústico observable deseado. Esta ecuación ahora se puede reescribir explícitamente como una ecuación diferencial a resolver para $\omega(t)$:

$$|\dot{\omega}(t)| = (k)^2 \frac{2\alpha_{\max}^2(\omega(t))}{|\bar{P}(\omega(t))|^2}$$

[0066] Se puede seguir un procedimiento análogo para cualquier tipo de fuente acústica, de modo que $\omega_s(t_\omega)$ se puede calcular directamente a partir del conocimiento de $\alpha_{\max}(\omega)$ y el espectro de energía deseado de la señal acústica observable. Téngase en cuenta que aunque $\alpha_{\max}(\omega)$ se escribe según la frecuencia, en algunas realizaciones también podría ser una función de variación lenta del tiempo $\alpha_{\max}(\omega(t), t)$. Esta situación puede surgir, por ejemplo, si la temperatura de la fuente aumenta lentamente con el tiempo, lo que requiere que se reduzca su amplitud de salida máxima. Siempre que la tasa de cambio de $\alpha_{\max}(\omega(t), t)$ con el tiempo sea lenta, específicamente si el cambio en $\alpha_{\max}(\omega(t), t)$ en el transcurso de un solo barrido es insignificante, el procedimiento instantáneo aún se puede aplicar con la condición de que la función $\omega(t)$ deberá volver a calcularse de vez en cuando. En el caso más general de que $\alpha_{\max}(\omega(t), t)$ cambie más rápidamente con el tiempo, ya no se garantiza que el algoritmo produzca barridos óptimos, porque el rendimiento general podría aumentar al ejecutar el dispositivo a menos de la amplitud máxima en algunos puntos del barrido (es decir, $\alpha_{\max}(\omega)$ podría reducirse en algunos puntos del barrido). Sin embargo, en este caso, el procedimiento todavía se puede usar de manera útil para calcular los barridos de prueba para una variedad de $\alpha_{\max}(\omega)$ reducidos.

[0067] Para algunas funciones simples $\alpha_{\max}(\omega)$ esta ecuación puede admitir una solución analítica para $\omega(t)$. De manera más general, se puede obtener una solución numérica aproximada mediante:

1. Elegir una frecuencia inicial $\omega_B(t)$ y una frecuencia final $\omega_E(t)$ para el barrido;
2. Ajustar $\omega = \omega_B$ y $t = 0$;
3. Avanzando en el tiempo t , integrar numéricamente $\omega(t)$ para obtener $\omega(t)$, en cada iteración, a continuación, utilizando el valor actual de $\omega(t)$ para evaluar $\alpha_{\max}^2(t) = \alpha_{\max}^2(\omega(t))$ y $|\bar{P}(t)|^2 = |\bar{P}(\omega(t))|^2$;
4. Detener la integración cuando $\omega_s = \omega_E$, y guardar el tiempo de finalización $t_E = t$.
5. Si se desea, $\omega(t)$ podría integrarse a lo largo del tiempo de $t = 0$ a $t = t_E$, obteniendo $\Phi(t)$, que junto con $\alpha(t)$ a continuación especifica el barrido completo $A(t) = \alpha(t)\sin(\Phi(t))$.

El valor inicial de $\Phi(t = 0)$ se puede elegir para definir la posición inicial de la fuente. También pueden usarse procedimientos numéricos más precisos (bien conocidos por los expertos en la materia de encontrar soluciones numéricas de ecuaciones diferenciales) para resolver esta ecuación, por ejemplo, procedimientos de Runge-Kutta o de cuadratura. La metodología se generaliza trivialmente al caso de los barridos descendentes, y a los dispositivos

para los cuales $\alpha_{\max}^2(\omega, t)$ también podría variar con el tiempo en el barrido. El tiempo de finalización $t = t_E$ proporciona el tiempo de barrido mínimo requerido para producir el espectro de salida deseado para esta fuente.

[0068] Por supuesto, la fuente podría funcionar a menos de la energía máxima si se desea, pero el tiempo de barrido para producir el mismo espectro de salida debe a continuación aumentar. Los barridos óptimos para estos casos se pueden calcular simplemente eligiendo uno más conservador $\alpha_{\max}^2(\omega, t)$.

[0069] Si $|\bar{P}(\omega)|^2$ representa un perfil de frecuencia deseado, es decir, una forma espectral relativa deseada en lugar de un nivel de densidad espectral de energía absoluta, a continuación k se puede escribir como $k = k_v k_u$, donde k_u convierte unidades como antes, y k_v es una "perilla de control de volumen". La cantidad k_v se puede variar para producir un menú de barridos a diferentes niveles de amplitud, cada uno de los cuales produce el perfil de frecuencia deseado, pero en un intervalo de posibles longitudes de barrido $t_E(k_v)$.

[0070] Si todo lo demás permanece igual, en este caso el tiempo de barrido se escalará como la inversa del

$$t_E(k_v) \propto \frac{1}{k_v^2}$$

cuadrado de k_v , es decir ,, por lo que es posible resolver directamente el valor de k_v que producirá

cualquier t_E deseado después de solo una iteración inicial. En algunas realizaciones, $\alpha_{\max}^2(\omega, t)$ también podría depender del tiempo en el barrido (por ejemplo, si el dispositivo se calienta durante un barrido, cambiando sus propiedades), en cuyo caso puede ser necesaria una solución iterativa sobre muchos valores de prueba de k_v para encontrar un barrido que permanezca justo dentro de un límite de tiempo de barrido deseado $t_{\max}$, es decir, para encontrar k_v de modo que $t_E(k_v) < t_{\max}$.

[0071] Volviendo a la Figura 5, en esta figura se muestra una lógica de funcionamiento adecuada para su uso con una realización que podría implementarse en la práctica. Cabe señalar y recordar que, aunque esta realización particular se discute en relación con un resonador de pistón marino, esta misma estrategia general podría usarse para diseñar un barrido óptimo o casi óptimo para un vibrador marino o vibrador terrestre, o más generalmente cualquier fuente de barrido de frecuencia controlada.

[0072] Según esta realización, se especificarán ciertos parámetros físicos del pistón (bloque 505). En la invención, se requiere especificar al menos el desplazamiento máximo del pistón que es posible (o aconsejable, permisible, deseable, etc.) para una fuente controlable particular. Además, en la invención, también se especificará la velocidad y aceleración máximas posibles (o aconsejables, permisibles, deseables, etc.) del pistón. Por último, y esto es opcional en muchos casos, se puede especificar la derivada temporal máxima posible (o aconsejable, permisible, deseable, etc.) de la aceleración (convencionalmente la "sacudida"). Este último parámetro es opcional en muchos casos porque puede que nunca entre en juego como una limitación, dependiendo del resonador particular involucrado y los valores de los otros parámetros seleccionados anteriormente.

[0073] A continuación, los valores de los parámetros seleccionados del bloque 505 se utilizarán para determinar las curvas límite para este resonador según la frecuencia (bloque 510). En la invención, las restricciones se cuantifican

en términos de la aceleración del volumen de la fuente $\ddot{V}(\omega)$ porque esta es una cantidad que se calcula fácilmente para una fuente de pistón marino, y ya se ha explicado, es proporcional a la presión acústica radiada. La aceleración del volumen está relacionada con el desplazamiento de la fuente x , la velocidad v , la aceleración a y la sacudida j a través del área del pistón A_p de la siguiente manera:

Desplazamiento:

$$\vec{V}(\omega) = A_p \omega^2 x(\omega)$$

Velocidad:

$$\vec{V}(\omega) = A_p \omega v(\omega)$$

Aceleración:

$$\vec{V}(\omega) = A_p a(\omega)$$

Sacudida:

$$\vec{V}(\omega) = A_p \frac{j(\omega)}{\omega}$$

[0074] La Figura 6 muestra estas cuatro curvas de restricción para un hipotético resonador de pistón marino. Como se puede observar, hay una curva correspondiente a cada uno de desplazamiento, velocidad, aceleración y

sacudida. Para los fines de la presente descripción, estas curvas se denominarán "curvas límite", cada una para el desplazamiento ("curva límite de desplazamiento"), la velocidad ("curva límite de velocidad"), la aceleración ("curva límite de aceleración") y, opcionalmente, la sacudida ("curva límite de sacudida"). Para este ejemplo, los valores límite de desplazamiento, velocidad y sacudida son constantes que no dependen de la frecuencia (es decir, son funciones constantes de ω), pero el límite de la aceleración depende de la frecuencia. En otras realizaciones, los valores límite de aceleración pueden ser constantes con la frecuencia, o los cuatro valores límite pueden variar con la frecuencia. En otras realizaciones, cualquiera o todas las curvas límite pueden ser el resultado de una combinación de dos o más restricciones. De hecho, para este dispositivo de ejemplo hay dos restricciones de aceleración, una constante con frecuencia y la otra no. La curva de límite de aceleración representada en la Figura 6 sigue el mínimo de estas dos restricciones. En otras realizaciones, puede haber más de cuatro curvas límite, o menos de cuatro curvas límite, dependiendo de los aspectos específicos del dispositivo particular. El mínimo de todas las curvas límite tomadas en conjunto proporciona el valor $\alpha_{\max}(\omega)$ introducido *supra*.

[0075] A continuación, las curvas limitantes calculadas en el bloque 510 se usarán para determinar las restricciones de barrido que son apropiadas para este resonador particular (bloque 515). Las curvas de la Figura 6 proporcionan un ejemplo de una forma en que esto podría hacerse. En este ejemplo, la línea gruesa asociada con la curva "Nivel restringido" se ha elegido para seguir la curva que tiene el valor mínimo para una frecuencia dada (una "curva de nivel restringido" o "curva de restricción", en lo sucesivo). El resultado es una curva continua que define en cada frecuencia el valor límite de $\alpha_{\max}(\omega)$, la aceleración de volumen transformada por Fourier que se utilizará en la ecuación presentada anteriormente para definir la señal de barrido.

[0076] Si este es un caso marino, en esta realización se especificará el espectro de energía de campo lejano deseado $|\overline{P}_{\text{campo lejano}}(\omega)|^2$ (bloque 520), entre las frecuencias de barrido inicial y final ω_B y ω_E . Esta podría ser cualquier forma espectral y, por ejemplo, podría ser constante en la banda de frecuencia elegida de la señal, es decir, un espectro plano.

[0077] En esta realización y continuando con la discusión de un resonador marino, a continuación, se seleccionará la profundidad operativa en el agua del resonador (bloque 530). Aunque esto contempla que esta realización funcionará en un entorno marino, como se analiza con más detalle a continuación, esa suposición se ha hecho en esta invención solo con fines de especificidad al analizar este ejemplo particular.

[0078] A continuación, en una realización, se calculará el espectro de campo cercano requerido normalizado a una distancia $|\overline{P}_{1m}(\omega)|^2$ de referencia de 1 metro, a partir del espectro de campo lejano deseado y la profundidad de operación elegida. Esto se puede hacer según los procedimientos bien conocidos por los expertos en la materia. Dicho esto, una forma de hacer este cálculo es la siguiente. Si la fuente está a la profundidad d y la velocidad del sonido en el agua es c , a continuación, el efecto del reflejo "fantasma" de la superficie del agua es modificar la amplitud espectral en el campo lejano de tal manera que

$$2 \left(1 - \cos \frac{2\omega d}{c} \right) = \frac{|\overline{P}_{\text{campo lejano}}(\omega)|^2}{|\overline{P}_{1m}(\omega)|^2}$$

Si el intervalo deseado de frecuencias de campo lejano distintas de cero incluye cualquiera donde este factor de propagación sea cero o casi cero, es necesario volver a elegir la profundidad de funcionamiento de la fuente d o el intervalo de frecuencia del barrido. El espectro de energía de campo cercano requerido se puede a continuación calcular en esta realización de la siguiente manera, bloque 535:

$$|\overline{P}_{1m}(\omega)|^2 = \frac{|\overline{P}_{\text{campo lejano}}(\omega)|^2}{2 \left(1 - \cos \frac{2\omega d}{c} \right)}$$

[0079] En este ejemplo, el espectro de salida $|\bar{A}(\omega)|^2$ se eligió para que fuera proporcional al espectro acústico de campo cercano $|\bar{P}_{1m}(\omega)|^2$, de modo que $|\bar{P}_{1m}(\omega)|^2 = k^2 |\bar{A}(\omega)|^2$. Para este ejemplo, con $A(t) = \hat{V}(t)$, $k = \left(\frac{\rho}{4\pi} \right)$ donde ρ es la densidad del agua y suponiendo una elección consistente de unidades para $\bar{P}_{1m}(\omega)$ y $\bar{A}(\omega)$. A continuación, el espectro acústico de campo cercano se puede convertir al espectro de

5 aceleración de volumen requerido a través de la siguiente ecuación:

$$|\bar{A}(\omega)|^2 = |\bar{P}_{1m}(\omega)|^2 / k^2$$

(bloque 540).

10

[0080] Volviendo ahora a la rama "TIERRA" de la Figura 5, en el caso de que el presente procedimiento se esté aplicando a un caso de tierra (vibraciones sísmicas), será necesario especificar el espectro de fuerza deseado (bloque 525). A continuación se pueden encontrar detalles adicionales.

15 **[0081]** Teniendo en cuenta lo anterior, los elementos especificados anteriormente se pueden usar para calcular cómo debe variar la frecuencia de barrido con el tiempo. La fórmula es la misma independientemente de si la tasa de cambio de frecuencia se calcula a partir del espectro de aceleración de volumen para el caso marino (bloque 545) o el espectro de fuerza para el caso terrestre (bloque 547):

$$|\dot{\omega}(t)| = \frac{2\alpha_{\max}^2(\omega(t))}{|\bar{A}(\omega(t))|^2}$$

20

[0082] Continuando con este ejemplo, en algunas realizaciones, la ecuación diferencial anterior puede integrarse con respecto al tiempo para obtener una expresión de frecuencia contra el tiempo $\omega(t)$ (bloque 550).

25 **[0083]** Para la fuente del pistón que se está considerando (es decir, la rama "RESONADOR"), las ecuaciones

$|\bar{A}(\omega)|^2 = \frac{2\alpha_{\max}^2(\omega)}{|\dot{\omega}(t)|}$ y $|\bar{A}(\omega)|^2 = (\omega^2 A_p)^2 |\bar{x}(\omega)|^2$ se pueden utilizar para resolver la amplitud RMS correspondiente del movimiento del pistón según tiempo (bloque 555):

$$|\bar{x}(\omega)| = \frac{\sqrt{2}\alpha_{\max}(\omega)}{\sqrt{|\dot{\omega}(t)|}(\omega^2 A_p)}$$

30

[0084] Para el ejemplo de un resonador de pistón de oscilación libre, esto es suficiente: en esta realización, el dispositivo funciona a su amplitud RMS máxima permisible $|\bar{x}(\omega(t))|$ a medida que la frecuencia de resonancia del dispositivo se ajusta con el tiempo según $\omega(t)$.

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$$

[0085] En otras realizaciones, se podría integrar para obtener $\Phi(t)$, y a continuación se podría usar $A(t) = \alpha(t)\sin(\Phi(t))$ con $\alpha(t) = \alpha_{\max}(\omega(t))$ para determinar el barrido $A(t)$ (es decir, el bloque 557 bajo la rama "VIBRADOR" de la Figura 5).

5 [0086] En la práctica, se podrían usar otros procedimientos para calcular las fases de rampa ascendente inicial y de rampa descendente final del barrido, usándose esta variación para el cuerpo del barrido en el medio.

[0087] Finalmente, se prevé que el barrido obtenido previamente se utilizará para controlar una fuente sísmica controlable como parte del estudio sísmico destinado a obtener imágenes de alguna porción del subsuelo de la tierra (bloque 560).

EJEMPLOS

[0088] Ahora se darán dos ejemplos de aplicaciones del procedimiento aplicado a dos fuentes diferentes a modo de ilustración de su uso para diseñar barridos sujetos a restricciones físicas impuestas por la fuente. El primer ejemplo se refiere a un vibrador en tierra; el segundo a una fuente de pistón marino.

[0089] En el primer ejemplo, se elegirá un vibrador terrestre que tenga las características publicadas del vibrador de baja frecuencia "Liquidator" de la Universidad de Texas:

Masa de reacción:	3575 kg
Desplazamiento relativo máx.:	$\pm 0,2$ m
Fuerza máx.:	89 kN

25 [0090] Con fines ilustrativos, se utilizarán los siguientes parámetros:

Velocidad relativa máx.:	3 m/s
Impedancia interna:	30.000 Ns/m
Fuerza máxima permitida a través de la impedancia interna:	10.000 N
Masa del pistón:	1000 kg
Impedancia de tierra:	106 Ns/m.

En la Figura 7 se muestra un boceto esquemático de un sistema representativo. El ejemplo de esta figura puede describirse como "de un solo extremo" porque solo su pistón está en contacto con el medio donde se propagará la señal (la tierra). El cuerpo proporciona una masa de reacción inercial.

[0091] Este ejemplo se expresará en términos de la velocidad del pistón en lugar de la aceleración del volumen que se ha utilizado con fines ilustrativos en las ecuaciones anteriores. Esto se debe en parte a que la medida de aceleración del volumen generalmente no es apropiada para una fuente terrestre, para la cual el área del pistón no es tan importante como para una fuente marina. También significa que los parámetros del sistema pueden describirse directamente en términos de impedancia mecánica, es decir, la relación entre la fuerza aplicada y la velocidad resultante a cualquier frecuencia dada. La gráfica de restricciones asociada con este ejemplo se muestra en consecuencia con el eje y calibrado en términos de velocidad de la placa de tierra en la Figura 8.

40 [0092] Suponiendo los parámetros seleccionados anteriormente, esta figura muestra que la fuente está limitada por el desplazamiento hasta aproximadamente 7 rad/seg ("restricción x"), a continuación, restringida por la fuerza máxima que su impedancia interna puede soportar hasta aproximadamente 17 rad/seg ("restricción fz"). Por encima de este punto, está limitado por la fuerza máxima que puede proporcionar el sistema hidráulico ("restricción fs"). El pico de salida está cerca de la fuerza máxima del actuador de fuerza; por encima de aproximadamente 1000 rad/seg, comienza a disminuir a medida que entra en juego la inercia de la placa base.

[0093] La curva de la Figura 8 tiene varias características notables. La restricción de velocidad no es simplemente una línea horizontal en este ejemplo. Esto se debe a que, mientras que el gráfico de restricción mide la velocidad de la placa de tierra, la restricción en sí está en la velocidad del pistón (placa base) en relación con el cuerpo del accionador, en lugar de en la velocidad del pistón en sí. A bajas frecuencias, la impedancia del medio es mayor que la inercia del actuador y el actuador se mueve sin mover mucho el medio. Sin embargo, a medida que aumenta la frecuencia, también lo hace la impedancia inercial y, en consecuencia, aumenta el movimiento impuesto al medio. Por lo tanto, en las frecuencias más altas, la restricción de velocidad se convierte en una línea horizontal.

55 [0094] Además, en este ejemplo, la restricción de fuerza interna ("fz") corre paralela a la restricción de velocidad. Esto se debe a que ambos dependen directamente de la velocidad relativa (y, por lo tanto, están en una proporción fija). El nivel absoluto de la restricción de fuerza interna es una estimación: se moverá hacia arriba o hacia

abajo si la fuerza interna permisible aumenta o disminuye, o si la impedancia interna estimada disminuye o aumenta.

[0095] La envolvente de restricción de velocidad se denotará como $v_{\max}$. El barrido deseado ahora se definirá

como la historia temporal que obedece a $v_{\max}$ que proporciona un espectro de fuerza requerido $\|\bar{f}_p(\omega)\|$ en el medio.

- 5 Para fuentes terrestres, la salida se define típicamente en términos de la fuerza de la placa terrestre aplicada a la Tierra, no de la presión acústica del campo lejano, por lo que el factor de conversión k no es necesario para este ejemplo, o alternativamente, $k = 1$ para este ejemplo. La función $\|\bar{f}_p(\omega)\|$ está relacionada con la velocidad del pistón $v_p(\omega)$ y la impedancia de tierra $z_m(\omega)$ mediante la ecuación:

$$|\bar{f}_p(\omega)| = \sqrt{2} v_p(\omega) z_m(\omega).$$

10

[0096] De las ecuaciones dadas anteriormente (en particular, el párrafo 0068), y teniendo en cuenta que la fuerza del suelo está tomando el lugar de la aceleración del volumen, se deduce que:

$$|\bar{f}_p(\omega)| = \sqrt{2} \frac{v_{\max}(\omega(t_\omega)) z_m(\omega(t_\omega))}{\sqrt{\dot{\omega}(t_\omega)}}.$$

15

[0097] Aquí t_ω es el tiempo donde pasa la frecuencia de barrido ω , $\|\bar{f}_p(\omega)\|$ es el espectro de la entrada de fuerza al suelo, y $v_{\max}(\omega)$ es el valor máximo deseado de la velocidad del pistón a la frecuencia angular ω .

- 20 **[0098]** Ahora se puede diseñar un barrido óptimo para este ejemplo. La tasa de cambio de frecuencia se puede extraer y resolver para obtener:

$$\dot{\omega}(t_\omega) = 2 \left(\frac{|v_{\max}(\omega(t_\omega)) z_m(\omega(t_\omega))|}{|\bar{f}_p(\omega)|} \right)^2$$

- 25 Dada la expresión anterior, la cuadratura numérica es un procedimiento para calcular la frecuencia según tiempo de la manera descrita anteriormente aplicada a esta realización.

[0099] Para un espectro plano de más de 1-16 Hz para un espectro de fuerza aplicado al suelo de 56 kN/Hz, la cuadratura numérica da el gráfico de frecuencia contra el tiempo de barrido que se muestra en la Figura 9.

30

[0100] La velocidad de la placa base frente al tiempo para este ejemplo se muestra en la Figura 10. La historia temporal de la fuerza de tierra asumiendo una fase inicial de cero se muestra en la Figura 11. Finalmente, el espectro de fuerza calculado numéricamente a partir de este barrido se muestra en la Figura 12. Es plano, según lo previsto, pero con ondulaciones en los bordes de la banda. Estas manifestaciones del efecto Gibbs que son evidentes en este ejemplo se producen por el inicio y el final abruptos del barrido y pueden reducirse mediante rampas de amplitud adecuadas de la manera conocida por los expertos en la materia.

35

[0101] En el segundo ejemplo, se modela una fuente resonante marina donde la dinámica interna resonante proporciona la mayor parte de la fuerza en su pistón. Este ejemplo se denominará "fuente de doble extremo" porque tanto el pistón como el cuerpo del dispositivo están en contacto con el agua y pueden contribuir a la señal de salida. Además del efecto directo del pistón y el cuerpo sobre el medio, este ejemplo da lugar a una impedancia de transferencia entre los dos extremos: la velocidad del pistón produce una fuerza sobre el cuerpo y la velocidad del cuerpo produce una fuerza sobre el pistón. Un boceto de sus componentes significativos aparece en la Figura 13.

40

- 45 **[0102]** La fuente de este ejemplo se puede modelar utilizando los siguientes parámetros.

Masa de la fuente:	15.000 kg
Masa del pistón:	4.000 kg
Desplazamiento relativo máx.:	60,1 m

Velocidad relativa máx.:	2 m/s
Fuerza máx. del actuador:	12 kN
Fuerza máxima permitida a través de la impedancia interna:	280 kN (solo en la parte sintonizable, véase más abajo)

[0103] La impedancia media para este ejemplo se establece igual a la impedancia de baja frecuencia del pistón, más una pequeña adición para el arrastre del fluido.

5 **[0104]** La impedancia de transferencia se modela como una pequeña proporción (0,1) de la impedancia del pistón con la adición de una amortiguación proporcional del 2 % con fines ilustrativos.

[0105] En este ejemplo, la impedancia interna z_s se modela como dos resortes en paralelo, uno con rigidez fija, el otro con rigidez variable y ajustable para que la frecuencia de resonancia de la fuente pueda controlarse para seguir el perfil de frecuencia/tiempo deseado. La aceleración máxima del pistón se establece por la fuerza más grande que los resortes que lo soportan pueden tolerar. El resorte de rigidez fija tiene una mayor capacidad de soporte de fuerza que el resorte de rigidez variable; en consecuencia, se pueden tolerar aceleraciones mayores a bajas frecuencias, donde el resorte fijo soporta la mayor parte de la fuerza requerida para acelerar el pistón. En consecuencia, la restricción de aceleración no es constante con la frecuencia.

15 **[0106]** Esta realización se aplicará ahora para obtener un barrido que producirá un espectro plano en el campo lejano entre las frecuencias de 3Hz y 50Hz, y para deducir su duración mínima.

[0107] El gráfico de restricciones para este ejemplo se muestra en la Figura 14. El eje y mide la aceleración del volumen, como se usa en la Figura 6: los expertos en la materia reconocerán que la elección es de conveniencia. Solo es necesario que la variable utilizada como restricción pueda relacionarse con las propiedades restringidas relevantes del movimiento en el modelo, y que se conozca el factor de escala y la señal de salida observable. Este gráfico de restricciones se ve muy diferente del caso de un solo extremo. Es una ventaja que se pueda aplicar igualmente fácilmente a fuentes acústicas de tipos de uno y dos extremos.

25 **[0108]** El modelo se utilizará ahora para calcular el barrido que da un espectro plano en el campo lejano de 200 dB referenciado a 1 micropascal por Hertz a 1 metro. Esto implica ajustar el barrido para permitir las distorsiones introducidas por la reflexión "fantasma" de la superficie del mar como se describió anteriormente. Si la aceleración de volumen se expresa en términos de aceleración de pistón a , y el espectro diana en términos del espectro de presión

30 de campo lejano $\bar{P}_{\text{campo lejano}}(\omega)$, es sencillo obtener la ecuación que rige el perfil de barrido óptimo a partir de las ecuaciones dadas anteriormente:

$$\bar{A}(\omega) = \bar{V}(\omega) = \bar{\alpha}(\omega) = A_p \bar{a}(\omega)$$

$$|\bar{A}(\omega)| = |\bar{P}_{1m}(\omega)| / k$$

$$k = 10^6 \left(\frac{\rho}{4\pi} \right),$$

$$|\bar{P}_{1m}(\omega)|^2 = \frac{|\bar{P}_{\text{campo lejano}}(\omega)|^2}{2 \left(1 - \cos \frac{2\omega d}{c} \right)},$$

35
y

$$|\dot{\omega}(t)| = \frac{2\alpha_{\max}^2(\omega(t))}{|\bar{A}(\omega(t))|^2}$$

de modo que

$$|\dot{\omega}(t)| = 4 \left(1 - \cos \frac{2\omega(t)d}{c} \right) \left(k A_p \frac{a_{\max}(\omega(t))}{\left| \bar{P}_{\text{campo lejano}}(\omega(t)) \right|} \right)^2$$

donde J es la profundidad de la fuente, y $A_{\max}(\omega)$ es la aceleración máxima deseada del pistón a la frecuencia angular ω . Aquí el factor de 10^6 en k es necesario debido a la elección (inconsistente) de las unidades: Unidades SI para $\bar{A}(\omega)$, pero micropascales por Hertz para $\bar{P}_{1m}(\omega)$.

[0109] Como antes, en este ejemplo se utilizará la integración numérica para calcular la frecuencia según tiempo para producir un barrido de 3 Hz a 50 Hz, que es un intervalo adecuado para ilustrar los efectos de las restricciones sobre el desplazamiento, la velocidad y la aceleración.

[0110] La frecuencia según tiempo se muestra en la Figura 15 para este ejemplo. Es evidente que la duración del barrido tiene que ser de aproximadamente 34 segundos para lograr el espectro de salida deseado. La presión referida a 1 m contra el tiempo se muestra en la Figura 16. El espectro de campo lejano se muestra en la Figura 17, en comparación con un nivel diana de 200 dB que se muestra como una línea discontinua. El espectro de campo lejano es plano, según lo previsto, excepto por las ondulaciones de ventana cerca de los bordes de la banda. El efecto Gibbs también es al menos parcialmente responsable de las amplitudes espectrales distintas de cero a frecuencias más altas en este ejemplo, que están moduladas por el efecto de la reflexión de fantasmas de la superficie del mar.

[0111] Finalmente, y volviendo ahora a la Figura 4, según otra realización más, se proporciona una fuente sísmica de frecuencia de barrido controlable que está diseñada para funcionar como se enseña en esta invención. Cabe señalar que, como se explica con más detalle a continuación, la realización de esta figura pretende representar, de manera general, fuentes tanto vibrantes (terrestres o marinas) como resonantes (marinas). En la realización de esta figura, la fuente 400 contendrá como mínimo un pistón 420 y un controlador 410 que controla el funcionamiento del pistón. Típicamente, el controlador contendrá al menos una CPU 430 de algún tipo (por ejemplo, un microprocesador, microcontrolador, matriz de puertas u otro dispositivo lógico programable) y cierta cantidad de memoria 440 (volátil o no volátil) accesible por la CPU 430 que típicamente se utilizará para contener un programa de barrido que se ha determinado según los procedimientos discutidos en esta solicitud. Téngase en cuenta que la memoria 440 puede ser externa o interna a la CPU 430. En funcionamiento, el controlador 410 controlará el funcionamiento del pistón radiante 420 durante su barrido diseñado según los procedimientos bien conocidos por los expertos en la materia. Además, en este ejemplo se proporciona una línea de control de resorte variable 460, que permite que el controlador 410 varíe la frecuencia de resonancia del pistón radiante 420, y un accionador 470 y su línea de control de accionador asociada 475 que permitirá controlar la envolvente del desplazamiento del pistón 420.

[0112] Téngase en cuenta que, aunque lo anterior se ha discutido en términos de resonador, los expertos en la materia entenderán cómo el ejemplo de la Figura 4 podría modificarse para representarlo eliminando la línea de control de resorte variable 460. Téngase en cuenta que en el caso de un resonador, es la envolvente del desplazamiento la que se controla, pero en un vibrador el desplazamiento en sí mismo se controla. Por supuesto, en el caso de un resonador o vibrador terrestre, se sustituiría una placa base en lugar del pistón utilizado para un resonador o vibrador marino.

[0113] El espectro de energía de la salida de una fuente de frecuencia de barrido es proporcional al cuadrado de su amplitud en el momento en que pasa por cualquier frecuencia dada, e inversamente proporcional a la tasa de cambio de frecuencia con el tiempo en ese mismo momento. Este hecho se puede explotar para determinar la tasa de cambio de frecuencia según tiempo que se requiere para producir cualquier espectro de salida requerido que el dispositivo sea capaz de producir, dada una amplitud máxima estipulada que el dispositivo puede producir según la frecuencia. También se puede usar para determinar la duración mínima de barrido requerida para producir el espectro requerido para una fuente de frecuencia de barrido dada.

[0114] Esta dependencia del espectro de la tasa de cambio de frecuencia se aplica a cualquier tipo de dispositivo que emita radiación acústica en un barrido de frecuencia: vibradores terrestres, fuentes piezoeléctricas de pozos, vibradores marinos, resonadores, sirenas, vibradores de pozos, etc. Por lo tanto, la metodología descrita en

esta invención es muy general y se aplica a cualquier tipo de fuente sísmica de barrido para la cual el límite a la amplitud de salida puede describirse según la frecuencia. Este tipo de análisis se aplica siempre que las tasas de cambio de amplitud y frecuencia son lentas en comparación con el período de la frecuencia que se emite, independientemente del tipo de dispositivo.

5

[0115] La estrategia enseñada en esta solicitud se puede utilizar para una variedad de otros propósitos que tienen que ver con la manipulación o corrección de la señal transmitida. Por ejemplo, si se desea obtener una señal con un perfil de frecuencia preferido y con una cierta duración, a continuación, el procedimiento se puede utilizar de forma iterativa para encontrar la amplitud máxima posible del espectro de señal de salida compatible con las capacidades físicas de la fuente y correspondiente a un barrido de la duración deseada. En general, la duración del barrido variará en proporción a la magnitud del espectro de energía diana, es decir, se produce el doble de energía al barrer el doble de tiempo.

10

[0116] Las enseñanzas de esta descripción también se pueden utilizar para corregir la variación con la frecuencia de la transmisión de la señal a través del entorno. Por ejemplo, la señal transmitida al subsuelo por una fuente sísmica marina se modifica por el reflejo "fantasma" de su señal desde la superficie del mar. Esta modificación se puede corregir mediante una aplicación del procedimiento descrito donde el perfil de frecuencia deseado se divide por la modificación no deseada. Esto producirá un espectro de señal de campo lejano del perfil deseado. Sin embargo, el procedimiento se limitará típicamente a intervalos de frecuencia donde el fantasma de superficie no produce la extinción total o casi extinción de la señal transmitida. Es bien sabido que dichos intervalos de frecuencia se pueden ajustar para incluir el intervalo de frecuencia deseado de la señal de fuente haciendo funcionar la fuente a una profundidad adecuada debajo de la superficie del mar.

15

20

[0117] El procedimiento instantáneo también se puede utilizar como una herramienta de diseño mediante la construcción de un modelo dinámico de una fuente controlable propuesta que incluye todos los aspectos del diseño que pueden afectar su salida. El modelo se utiliza para estimar la amplitud de salida máxima de la fuente según la frecuencia. A continuación, el presente procedimiento se puede usar para predecir la longitud mínima de barrido que se requerirá para producir un espectro de salida deseado, y se puede usar además para estimar el impacto de los cambios de diseño en la longitud de barrido para llegar a un diseño que produzca el espectro deseado con un barrido no más largo que un tiempo deseado.

25

30

[0118] El procedimiento instantáneo se puede usar junto con mediciones experimentales de la salida máxima de la fuente según la frecuencia en lugar de con estimaciones basadas en un modelo dinámico. Todo lo que se requiere para usar el procedimiento es una estimación confiable de la salida máxima de la fuente, sin importar cómo se derive, y un espectro de energía de salida deseado.

35

[0119] En lo que antecede, gran parte del debate se ha realizado en gran medida en términos de estudios sísmicos convencionales, pero eso se hizo sólo con fines ilustrativos y no con la intención de limitar la aplicación de las enseñanzas de la presente descripción sólo a ese tipo de estudios. Los expertos en la materia entenderán cómo las realizaciones presentadas *anteriormente* podrían aplicarse fácilmente, a modo de ejemplo, a estudios 2D, 3D, 4D, etc., estudios de fondo de pozo o cualquier combinación de los mismos, y a casos donde la fuente emite sonido en barridos disjuntos, con intervalos de silencio relativo en el medio, o a casos donde la fuente emite sonido continuamente o durante intervalos de tiempo relativamente largos sin interrupciones.

40

[0120] Cuando en esta invención se hace referencia a un procedimiento que comprende dos o más etapas definidas, las etapas definidas pueden llevarse a cabo en cualquier orden o simultáneamente (excepto cuando el contexto excluya esa posibilidad), y el procedimiento también puede incluir una o más etapas que se lleven a cabo antes de cualquiera de las etapas definidas, entre dos de las etapas definidas o después de todas las etapas definidas (excepto cuando el contexto excluya esa posibilidad).

45

50

[0121] Si bien el sistema y el procedimiento se han descrito e ilustrado en esta invención con referencia a ciertas realizaciones en relación con los dibujos adjuntos, los expertos en la materia pueden realizar diversos cambios y modificaciones adicionales, además de los que se muestran o sugieren en esta invención, sin apartarse del alcance de la invención, tal como se define en las siguientes reivindicaciones.

55

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de exploración sísmica por encima de una región del subsuelo de la tierra que contiene características estructurales o estratigráficas propicias para la presencia, migración o acumulación de hidrocarburos, comprendiendo el procedimiento:
 - (a) seleccionar una fuente controlable (400) que comprende un alojamiento y un pistón (420) ubicado dentro de dicho alojamiento para generar una señal de barrido;
 - (b) seleccionar una pluralidad de parámetros característicos de dicha fuente controlable (400), donde dicha pluralidad de parámetros comprende al menos:
 - un valor máximo de desplazamiento del pistón,
 - un valor máximo de velocidad del pistón, y
 - un valor máximo de aceleración del pistón;
 - (c) determinar (510) curvas límite para cada una de dicha pluralidad de parámetros según la frecuencia, donde dichas curvas límite comprenden:
 - una curva límite de desplazamiento calculada según dicho valor máximo de desplazamiento del pistón,
 - una curva límite de velocidad calculada según dicho valor máximo de velocidad del pistón, y
 - una curva de límite de aceleración calculada según dicho valor máximo de aceleración del pistón, ydonde cada una de dichas curvas límite se basa en una restricción de aceleración de volumen;
 - (d) usar (515) dichas curvas límite determinadas para obtener una curva de restricción para dicha fuente controlable (400);
 - (e) determinar (560) a partir de dicha curva de restricción una señal de barrido para dicha fuente controlable (400); y,
 - (f) usar dicha señal de barrido junto con dicha fuente controlable (400) para recopilar datos sísmicos cerca de una región del subsuelo de la tierra como parte de un perfil de barrido donde la fuente controlable (400) opera en o cerca de una salida de energía acústica máxima de la fuente controlable (400) haciendo funcionar la fuente controlable (400) a un nivel de salida máximo capaz por la fuente controlable (400),donde operar la fuente controlable (400) en o cerca de la salida de energía acústica máxima minimiza una duración del barrido o maximiza una amplitud alcanzable para un perfil de frecuencia diana cuando el barrido tiene una duración de barrido permitida dada.
2. El procedimiento de exploración sísmica según la reivindicación 1, donde dicha fuente controlable (400) se selecciona de entre el grupo que consiste en un resonador marino, un vibrador marino y un vibrador de pozo.
3. El procedimiento de exploración sísmica según la reivindicación 2, donde, siendo dicha fuente controlable (400) un resonador marino, dicho pistón (420) es un pistón resonador, donde, en dicha pluralidad de parámetros, el valor máximo de desplazamiento del pistón es un desplazamiento máximo del pistón del resonador, el valor máximo de velocidad del pistón es una velocidad máxima del pistón del resonador, el valor máximo de aceleración del pistón es una aceleración máxima del pistón del resonador, y, donde dicha pluralidad de parámetros comprende además una sacudida máxima del pistón del resonador.
4. El procedimiento de exploración sísmica según la reivindicación 3, donde cada una de dichas curvas límite utiliza la restricción de aceleración de volumen determinada según:

$$\ddot{V}(\omega) = A_p \omega^2 x(\omega)$$

$$\dot{V}(\omega) = A_p \omega v(\omega)$$

$$\dot{V}(\omega) = A_p a(\omega)$$

$$\dot{V}(\omega) = A_p \frac{j(\omega)}{\omega}$$

donde $\ddot{V}(\omega)$ es la restricción de aceleración de dicho volumen,
donde ω es una frecuencia,

- 5 donde A_p es un área de sección transversal de dicho pistón resonador,
donde $x(\omega)$ es el desplazamiento máximo de dicho pistón resonador,
donde $v(\omega)$ es la velocidad máxima de dicho pistón resonador,
donde $a(\omega)$ una aceleración máxima del pistón resonador, y,
donde $j(\omega)$ es la sacudida máxima de dicho pistón resonador.

10

5. El procedimiento de exploración sísmica según la reivindicación 2, donde, siendo dicha fuente controlable (400) un resonador marino, cada una de dichas curvas límite utiliza la restricción de aceleración de volumen determinada según:

$$\ddot{V}(\omega) = A_p \omega^2 x(\omega)$$

15

$$\dot{V}(\omega) = A_p \omega v(\omega)$$

$$\dot{V}(\omega) = A_p a(\omega)$$

20

donde $\ddot{V}(\omega)$ es la restricción de aceleración de dicho volumen,
donde ω es una frecuencia,
donde A_p es un área de sección transversal de dicho pistón,
donde $x(\omega)$ es el desplazamiento máximo de dicho pistón,
25 donde $v(\omega)$ es la velocidad máxima de dicho pistón, y,
donde $a(\omega)$ es la aceleración máxima de dicho pistón.

6. Una fuente sísmica de frecuencia de barrido controlable (400), que comprende:

30

- (a) un alojamiento;
(b) un pistón (420) dentro de dicho alojamiento, dicho pistón está configurado al menos para generar una señal sísmica de frecuencia de barrido; y,
(c) un controlador (410) en comunicación electrónica con dicho pistón (420), donde dicho controlador (410) contiene un programa de barrido para mover dicho pistón (420) dentro de dicho alojamiento para generar dicha señal sísmica de frecuencia de barrido, donde el controlador (410), para determinar dicho programa de barrido, está configurado para:

35

- (c1) determinar para dicho pistón (420) al menos:

40

- un valor máximo de desplazamiento del pistón,
un valor máximo de velocidad del pistón, y
un valor máximo de aceleración del pistón,

para determinar curvas límite que comprenden una curva límite de desplazamiento, una curva límite de velocidad y una curva límite de aceleración;

(c2) utilizar dicho valor máximo de desplazamiento del pistón para calcular la curva límite de desplazamiento;

(c3) utilizar dicho valor máximo de velocidad del pistón para calcular la curva límite de velocidad;

(c4) utilizar dicho valor máximo de aceleración del pistón para calcular la curva límite de aceleración;

(c5) utilizar dicha curva límite de desplazamiento, dicha curva límite de velocidad y dicha curva límite de aceleración para determinar (560) una curva límite restringida,

donde cada una de dicha curva límite de desplazamiento, dicha curva límite de velocidad y dicha curva límite de aceleración es una función de la frecuencia, y

donde cada una de dichas curvas límite se basa en una restricción de aceleración de volumen; y,

(c6) determinar a partir de dicha curva límite restringida dicho programa de barrido para dicha fuente sísmica,

donde la fuente controlable (400) está configurada para funcionar en o cerca de una salida de energía acústica máxima usando dicho programa de barrido,

donde operar en o cerca de la salida de energía acústica máxima minimiza una duración del barrido o maximiza una amplitud alcanzable para un perfil de frecuencia diana cuando el barrido tiene una duración de barrido permitida dada.

7. La fuente sísmica de frecuencia de barrido controlable según la reivindicación 6, donde dicha fuente de frecuencia de barrido controlable (400) se selecciona de entre el grupo que consiste en un resonador marino, un vibrador marino, un vibrador terrestre y un vibrador de pozo.

8. La fuente sísmica de frecuencia de barrido controlable según la reivindicación 7, donde dicha fuente sísmica de frecuencia de barrido controlable (400) es un resonador marino, el controlador (410) está configurado para calcular dicha curva límite de desplazamiento según

$$\tilde{V}(\omega) = A_p \omega^2 x(\omega)$$

donde dicha curva de limitación de velocidad se calcula según

$$\tilde{V}(\omega) = A_p \omega v(\omega)$$

donde dicha curva de limitación de la aceleración se calcula según

$$\tilde{V}(\omega) = A_p a(\omega),$$

donde $\tilde{V}(\omega)$ es la restricción de aceleración de dicho volumen,

donde ω es una frecuencia,

donde A_p es un área de sección transversal de dicho pistón,

donde $x(\omega)$ es el desplazamiento máximo de dicho pistón

donde $v(\omega)$ es la velocidad máxima de dicho pistón, y,

donde $a(\omega)$ es la aceleración máxima de dicho pistón.

Figura 1

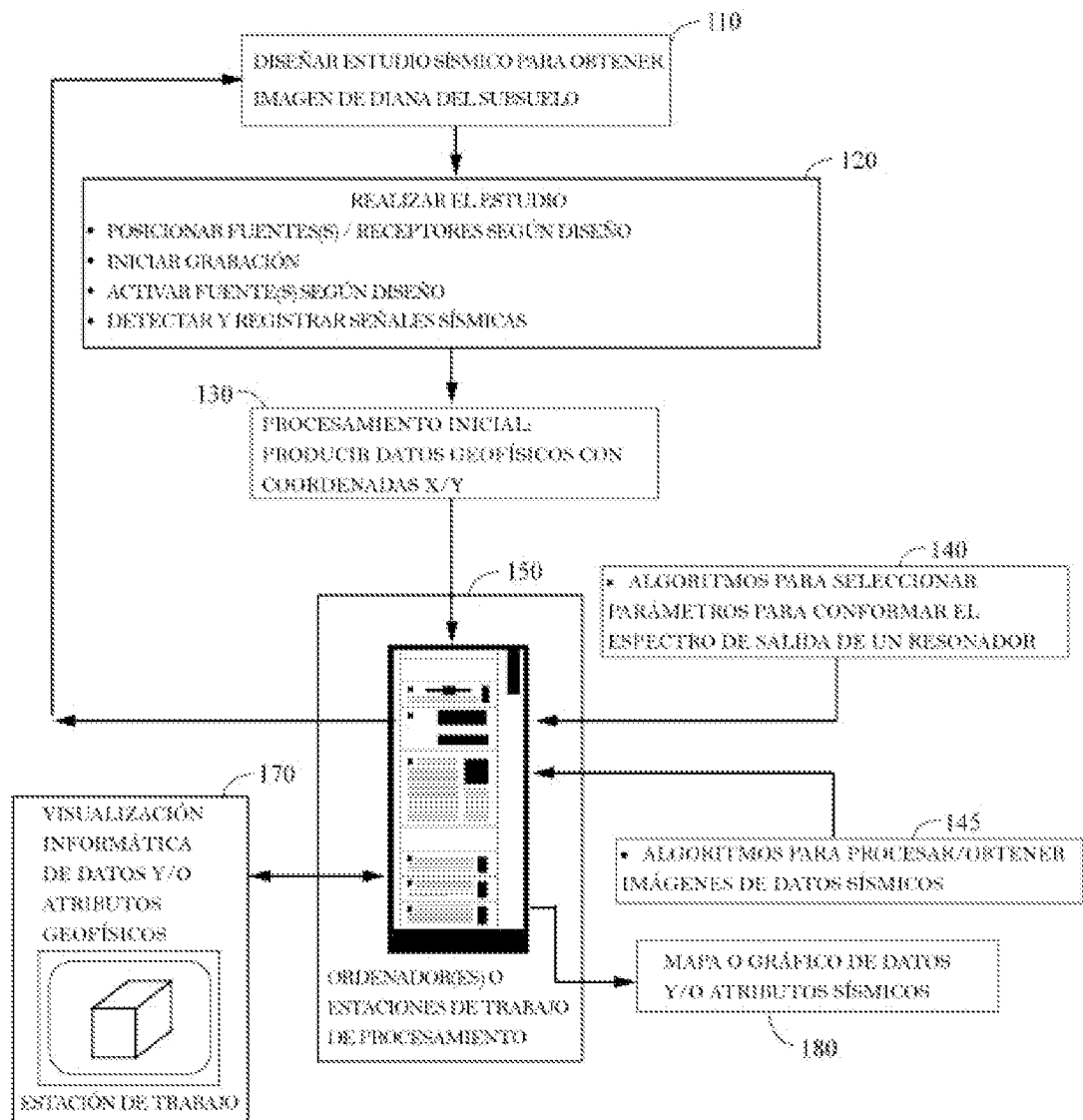


Figura 2

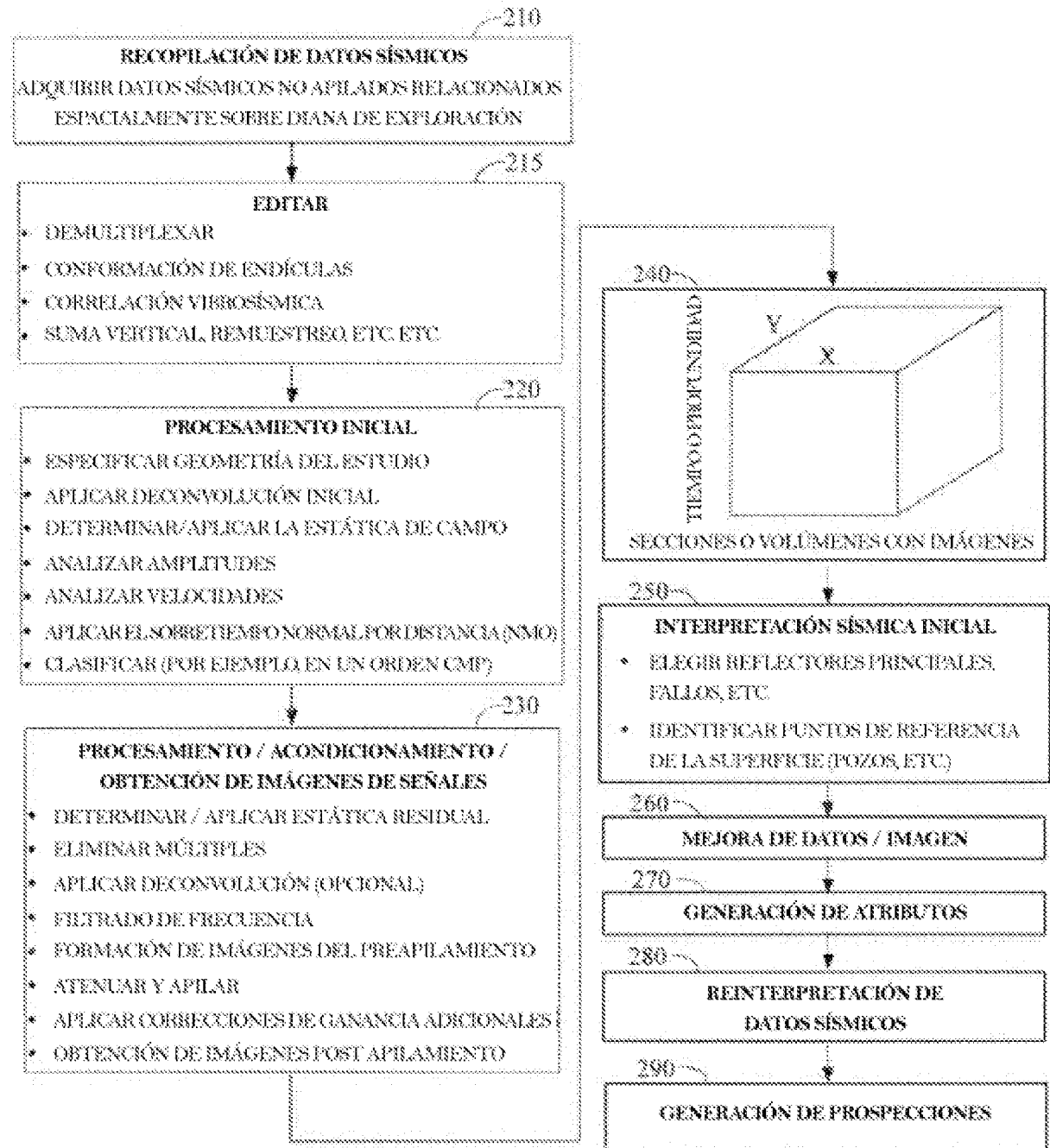


Figura 3

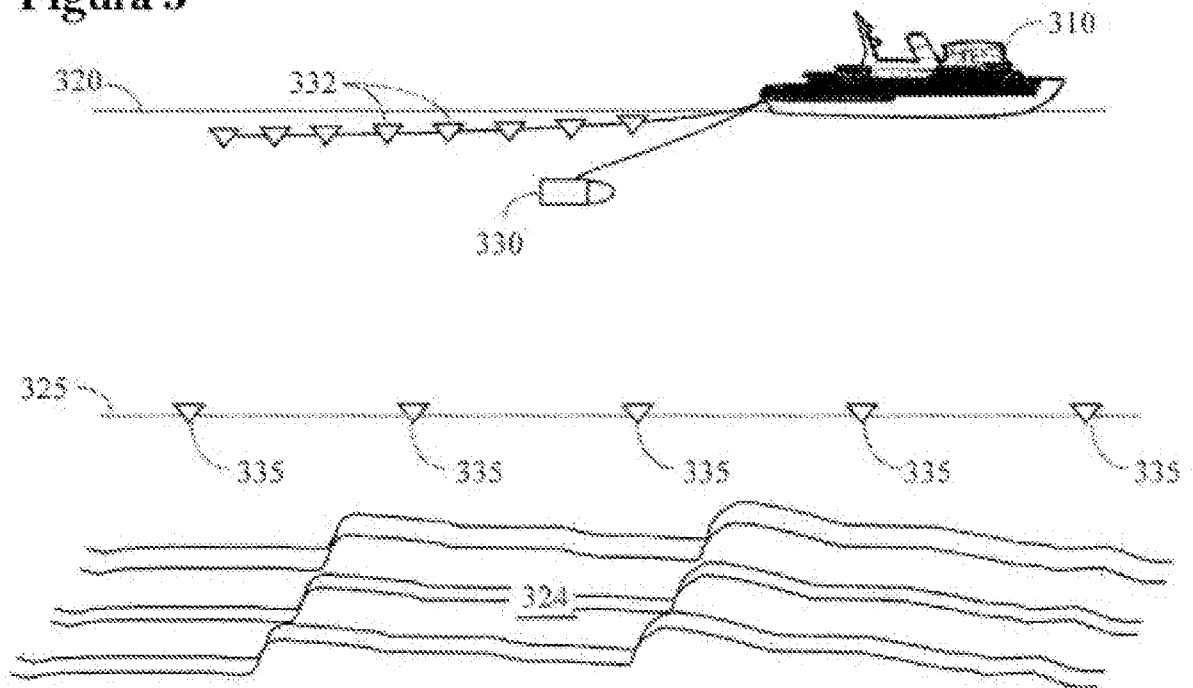


Figura 4

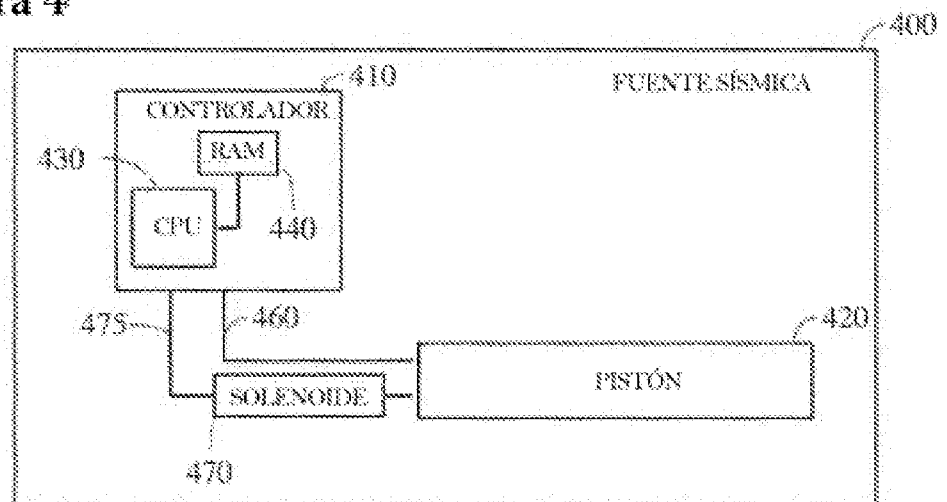


Figura 5

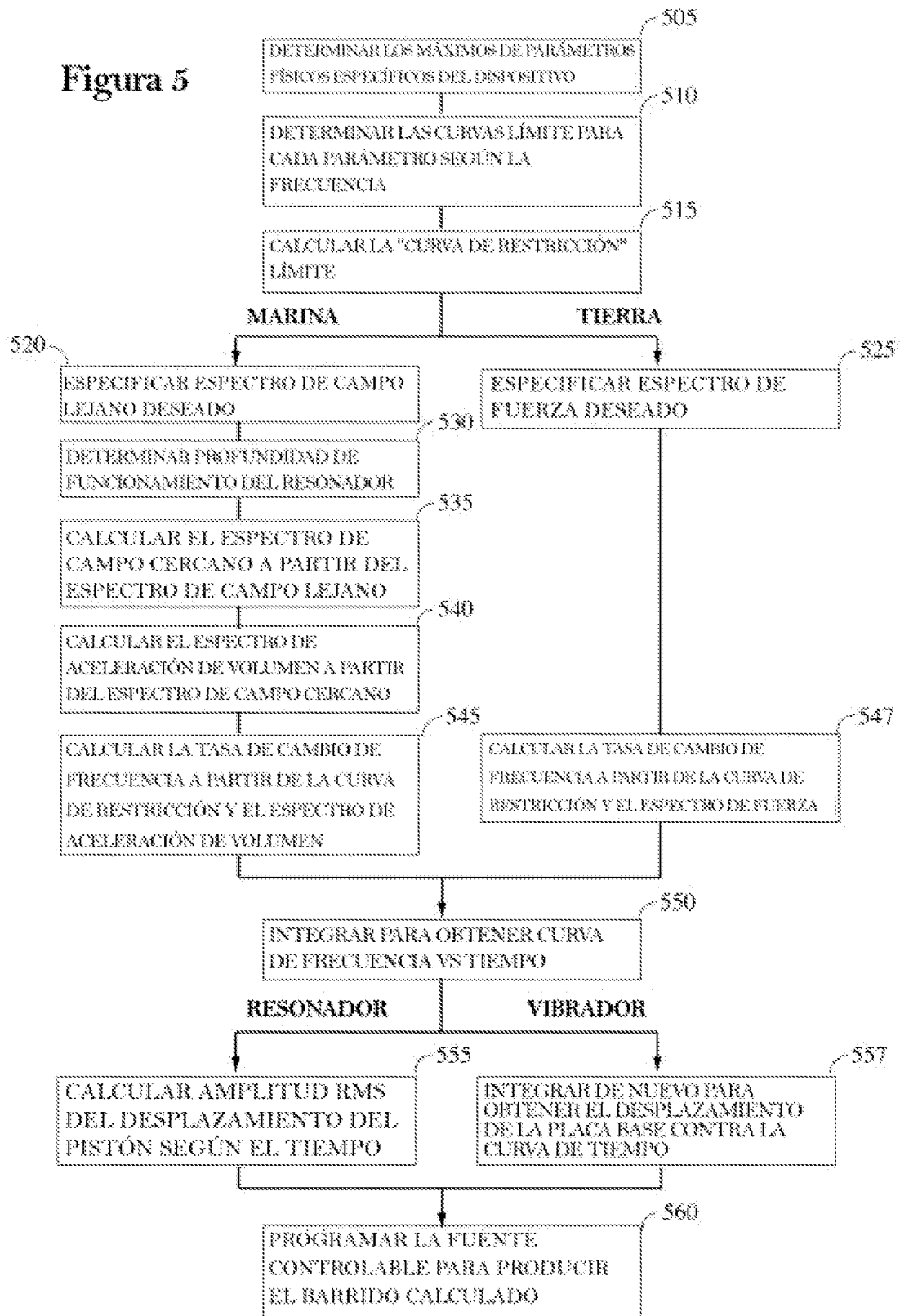


Figura 6

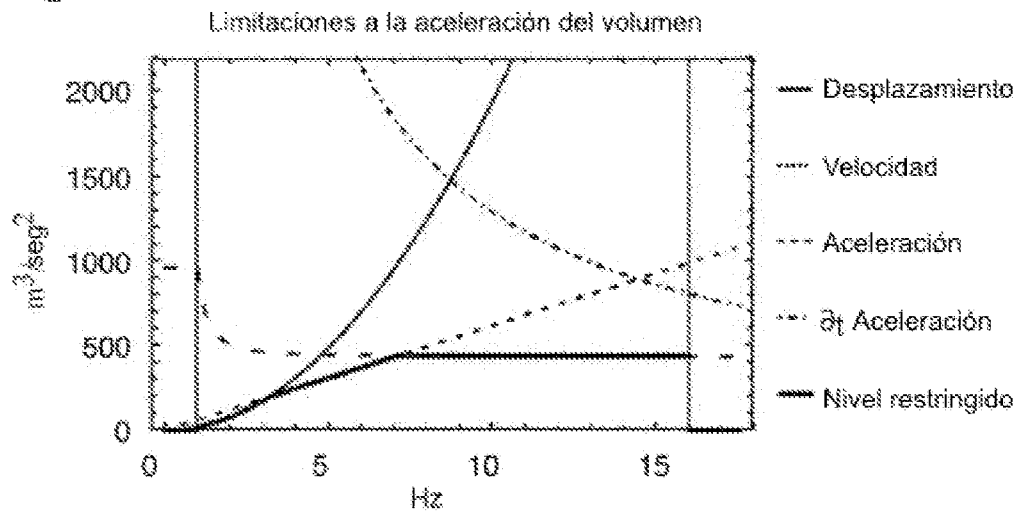


Figura 7

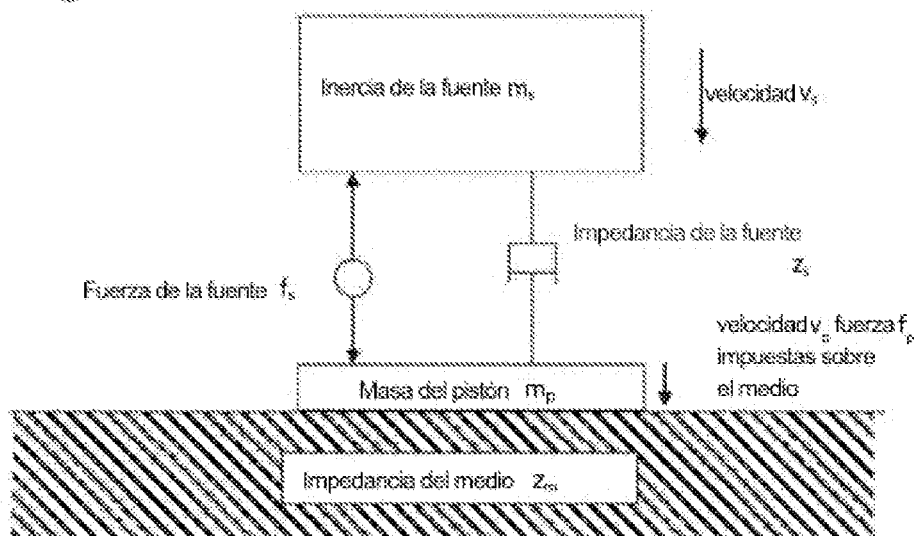


Figura 8

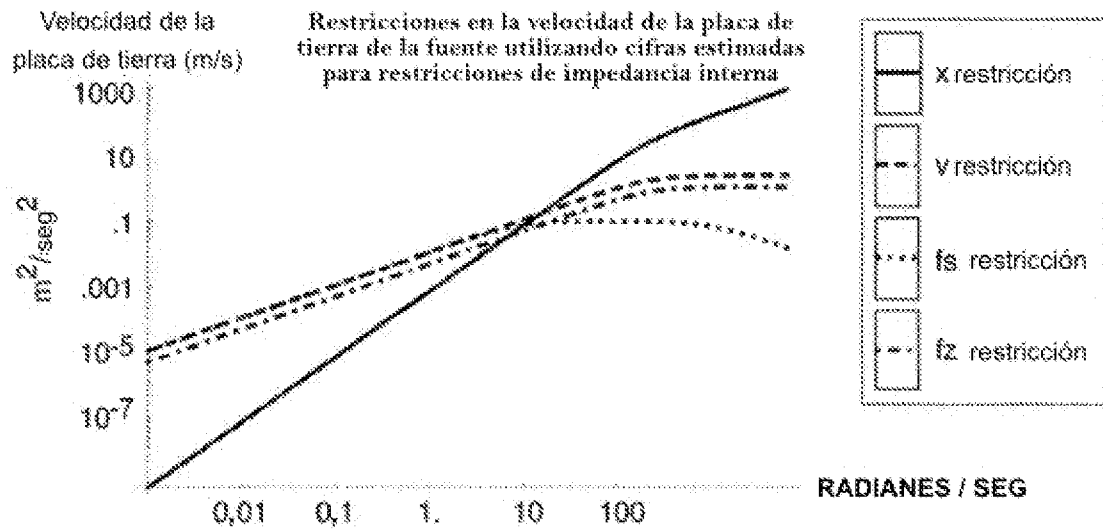


Figura 9

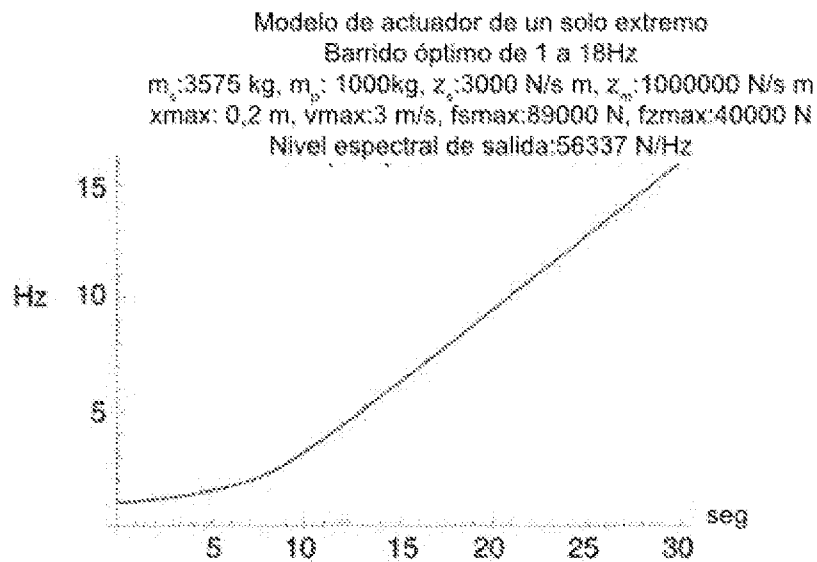


Figura 10

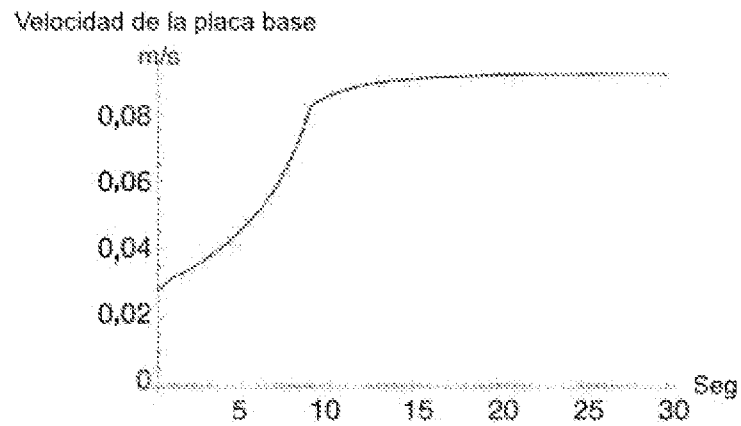


Figura 11

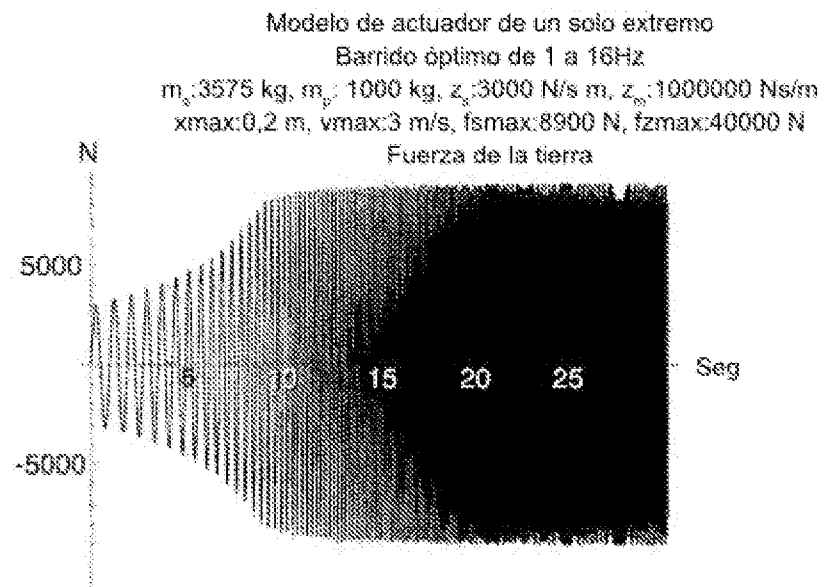


Figura 12

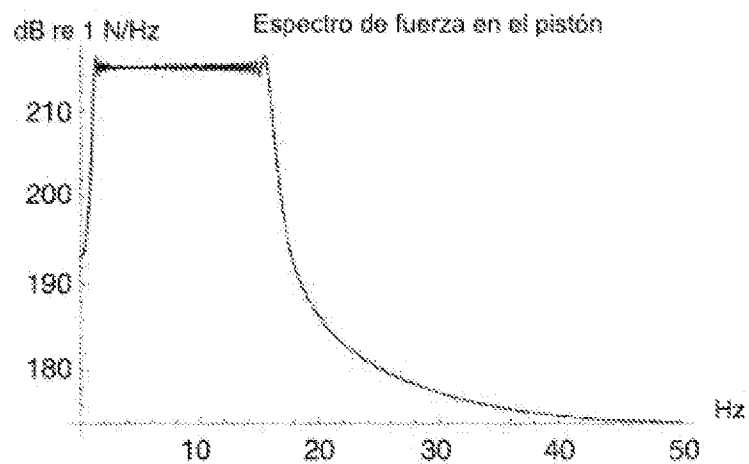


Figura 13

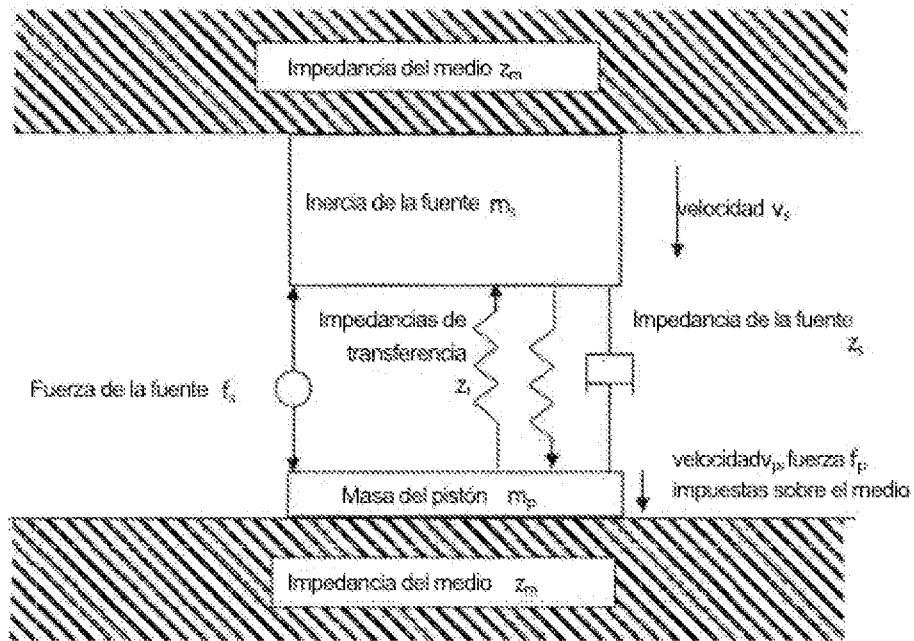


Figura 14

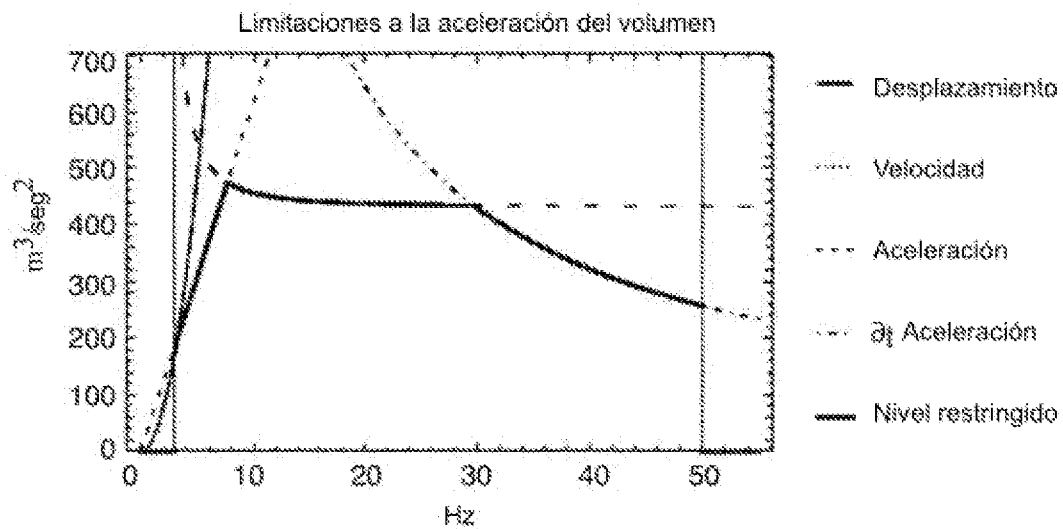


Figura 15

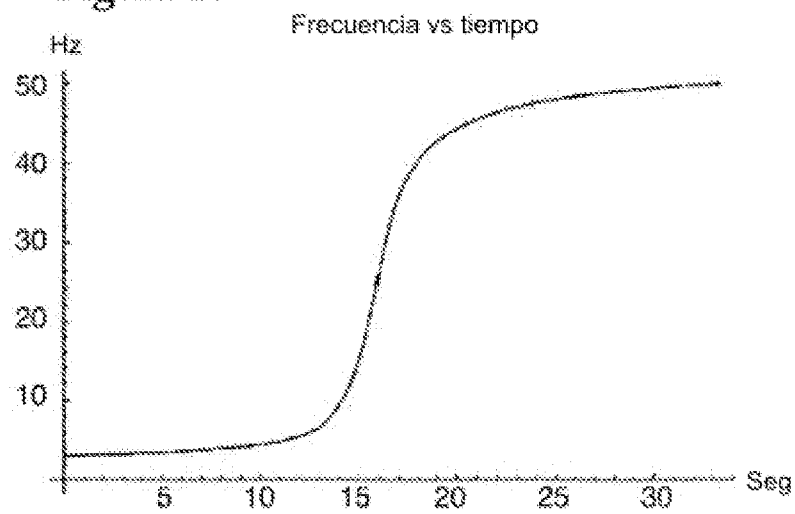


Figura 16

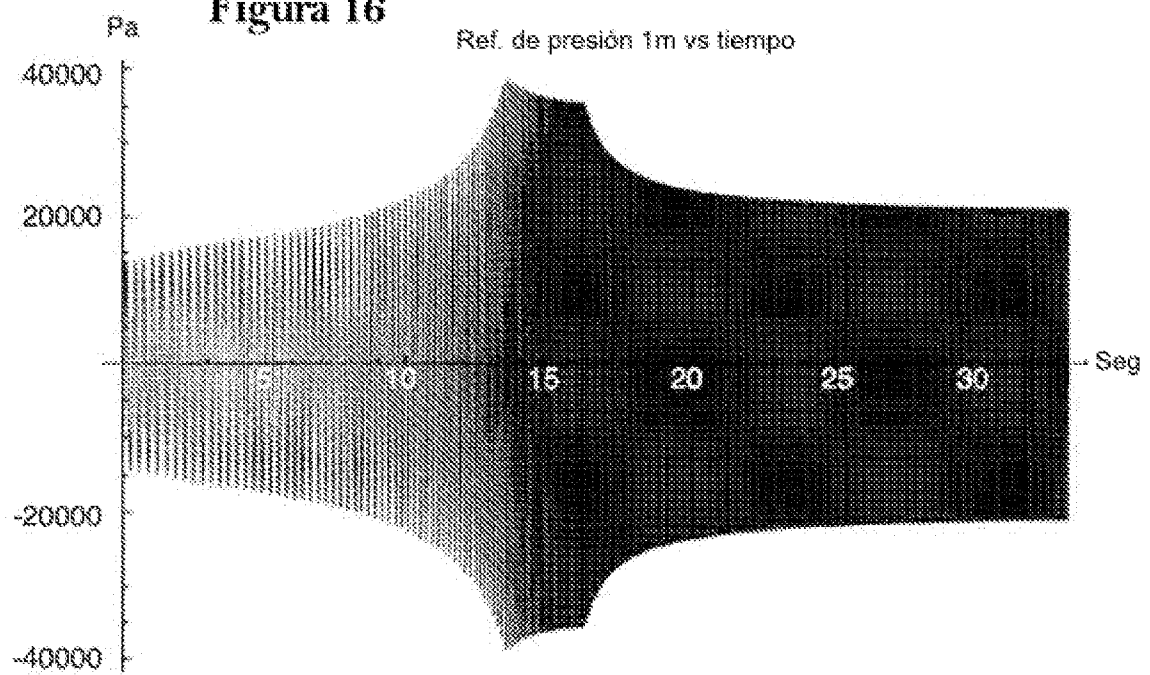


Figura 17

