

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 726 814**

51 Int. Cl.:

G01D 5/353 (2006.01)

G01D 5/26 (2006.01)

G01N 29/09 (2006.01)

G01H 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.06.2013 PCT/GB2013/051701**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.01.2014 WO14001807**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.06.2013 E 13733439 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2019 EP 2867626**

54 Título: **Detección de fibra óptica**

30 Prioridad:

29.06.2012 GB 201211561

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

09.10.2019

73 Titular/es:

**OPTASENSE HOLDINGS LIMITED (100.0%)
Cody Technology Park Ively Road Farnborough
Hampshire GU14 0LX, GB**

72 Inventor/es:

GODFREY, ALASTAIR

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 726 814 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

Detección de fibra óptica

5 Esta solicitud se refiere a la detección de fibra óptica, tal como la detección acústica distribuida de fibra óptica, con detección/monitorización de las características del entorno que rodea a la fibra óptica. En particular, la solicitud se refiere a aparatos y métodos para la detección de fibra óptica que permiten detección de las características de un medio en contacto con el cable de fibra óptica de detección, tal como la impedancia mecánica o acústica de dicho medio.

10 La detección de fibra óptica es conocida por una variedad de aplicaciones diferentes. Los sensores de fibra óptica, habitualmente, funcionan interrogando una fibra óptica con radiación óptica y analizando cualquier radiación retrodispersada, ya sea desde sensores de punto deliberados dentro de la fibra (p. ej., rejillas de Bragg de fibra o similares) para detectar sitios de dispersión intrínseca dentro de la propia fibra, para determinar diversos parámetros, tal como la tensión, la vibración o la temperatura. Los documentos WO2012/028846 A2 y JP S64 35284 A, p. ej., se refieren a la detección de campos magnéticos por medio de detección de fibra óptica.

15 Un tipo de detección de fibra óptica es la detección acústica distribuida de fibra óptica (DAS, por sus siglas en inglés), en donde la fibra óptica se interroga para proporcionar la detección de la actividad acústica a lo largo de su longitud. Normalmente, se lanzan uno o más pulsos ópticos en la fibra y se detecta la radiación retrodispersada desde el interior de la fibra, es decir, la retrodispersión de los sitios de dispersión intrínsecos inherentes en la fibra, en lugar de reflectores discretos introducidos deliberadamente. Se analiza la radiación retrodispersada detectada. El análisis divide efectivamente la fibra óptica en una pluralidad de porciones de detección discretas. Dentro de cada una de las porciones de detección discreta, las perturbaciones mecánicas de la fibra, por ejemplo, debido a las ondas acústicas incidentes, causan una variación en las propiedades de la radiación que se retrodispersa de esa porción. Esta variación se detecta y analiza, y se utiliza para dar una medida de la intensidad de la perturbación de la fibra en esa porción de detección. El documento GB2,442,745 describe un ejemplo de un sistema de DAS. A medida que la radiación, que se detecta y analiza, se dispersa desde los sitios de dispersión intrínseca en la fibra, la dispersión y, por lo tanto, la función de detección, se distribuye a lo largo de toda la longitud la fibra.

20 La DAS ha sido propuesta para una variedad de aplicaciones diferentes. Por ejemplo, se ha propuesto utilizar DAS de fibra óptica para la seguridad de perímetro, utilizando una fibra óptica de detección desplegada a lo largo de la ruta del perímetro de interés, para monitorizar las señales acústicas asociadas con intrusos. También se ha sugerido utilizar sensores de fibra óptica para la monitorización estructural al insertar fibras ópticas en el medio de la estructura a ser monitorizada.

25 Por lo tanto, la DAS se basa en las ondas/vibraciones de presión incidentes que actúan sobre la fibra óptica para alterar las características de la retrodispersión de la fibra. Sin embargo, la respuesta de un sensor de DAS a un estímulo dado puede depender del entorno en el que se despliega la fibra óptica y del acoplamiento de la fibra óptica, que, generalmente, estará en algún tipo de estructura del cable de fibra óptica, en el entorno circundante.

30 En algunas aplicaciones sería útil determinar algunas características del entorno en el que se despliega la fibra óptica. Las realizaciones de la presente invención, por lo tanto, proporcionan sensores de fibra óptica capaces de determinar algunas características del entorno en el que se despliega la fibra de detección.

35 Por lo tanto, de acuerdo con la presente invención, se proporciona un método de detección de fibra óptica que comprende: interrogar con radiación óptica una fibra óptica desplegada en un área de interés, en donde, al menos parte de la fibra óptica está acoplada mecánicamente a al menos un primer elemento sensible, en uso, a campos electromagnéticos; aplicar una corriente eléctrica variable para inducir una fuerza variable en dicho primer elemento; y analizar la radiación óptica retrodispersada desde dentro de dicha fibra óptica para determinar una señal de medición indicativa de cualquier variación en la radiación retrodispersada, correspondiente a dicha corriente eléctrica aplicada, y analizar dicha señal de medición para determinar una característica del entorno en el que se despliega la fibra óptica.

40 Por lo tanto, el método acopla mecánicamente al menos parte de la fibra óptica, que se utiliza para detectar, a un primer elemento que, en uso, es sensible a campos electromagnéticos. En otras palabras, el primer elemento está configurado de tal manera que un campo eléctrico y/o un campo magnético aplicado puede inducir una fuerza en el primer elemento. Por lo tanto, el método implica aplicar una corriente variable para inducir una fuerza variable en el primer elemento. En particular, la corriente aplicada puede ser una corriente alterna.

45 La inducción de una fuerza variable en el primer elemento, que está acoplado mecánicamente a la fibra óptica, dará como resultado que al menos alguna fuerza también se aplique a la fibra óptica. Esto puede resultar en un cambio detectable en las propiedades de radiación óptica retrodispersada de la fibra óptica. En esencia, la fuerza inducida proporciona un estímulo a la fibra, que puede detectarse utilizando las técnicas de detección acústica distribuida,

como se describió anteriormente, para proporcionar una señal de medición. La utilización de una corriente alterna para proporcionar una fuerza variable, en efecto, proporciona un estímulo de tipo acústico continuo.

5 El grado de variación en las propiedades de la radiación retrodispersada y, por lo tanto, de la señal de medición detectada, dependerá, sin embargo, del entorno en el que se despliega la fibra óptica y, por lo tanto, las señales de medición se pueden utilizar para determinar diversas características del entorno, como se describirá con más detalle más adelante.

10 En una realización, el primer elemento puede ser un primer conductor que, en uso, transporta una corriente eléctrica. Como entenderá un experto en la técnica, un conductor en el que fluye una corriente experimentará, en presencia de un campo magnético, una fuerza dependiente del campo magnético y del flujo de corriente. Por lo tanto, el método puede comprender generar, en uso, una corriente eléctrica en el primer conductor en presencia de un campo magnético, en donde la corriente variable se aplica para crear un flujo de corriente variable en el primer conductor y/o un campo magnético variable.

15 En algunas realizaciones, la corriente variable, p. ej., corriente alterna, puede aplicarse al primer conductor. Por lo tanto, el método puede comprender disponer la fibra óptica y el primer conductor en un campo magnético en uso y aplicar la corriente alterna al primer conductor para inducir la fuerza variable en el primer conductor. Por aplicar la corriente variable al primer conductor, se entiende la generación de la corriente variable en el conductor.

20 En algunas realizaciones, sustancialmente, el componente principal del campo magnético que actúa sobre el primer conductor, puede ser el campo magnético ambiental en la proximidad de la fibra, por ejemplo, el campo resultante del campo magnético de la Tierra. En otras palabras, la fibra óptica y el primer conductor pueden desplegarse en una ubicación de interés, de tal manera que cualquier campo magnético que actúe sobre el primer conductor en uso surja de la ubicación de interés (en lugar de cualquier elemento desplegado específicamente para generar un campo magnético).

25 En algunas realizaciones, el método puede basarse principalmente en el campo magnético ambiental de la Tierra en la ubicación de la fibra de detección y del primer conductor. Se ha descubierto que la aplicación de una corriente alterna a un conductor acoplado a una fibra óptica puede producir una señal detectable en la retrodispersión de la fibra óptica, es decir, una señal de medición detectable, en presencia de solo el campo magnético ambiental de la Tierra. Por lo tanto, el método puede comprender aplicar la corriente alterna a una magnitud suficiente para inducir una fuerza en el primer conductor que producirá una señal de medición detectable en presencia de solo el campo magnético de la Tierra. Basándose solo en el campo magnético de la Tierra, una corriente en el orden de unos pocos amperios puede ser suficiente para generar una señal detectable, por ejemplo, se ha demostrado que una corriente alterna de 3 amperios o más proporciona una señal detectable en la fibra óptica y, en algunas realizaciones bien ajustadas, la corriente de 1 amp o más puede ser suficiente. Cuando se utiliza el campo magnético de la Tierra, la fibra óptica y el primer conductor acoplado, pueden estar dispuestos en una alineación deseada con la dirección del campo magnético predominante para al menos partes del despliegue de la fibra óptica y del primer conductor.

35 Se apreciará que cualquier otra fuente de campos magnéticos que ya esté presente en el entorno, también contribuirá al campo magnético ambiental. Por ejemplo, la presencia de cualquier material magnético permanente en el entorno también impactará en el campo magnético ambiental. Por lo tanto, el campo magnético ambiental puede ser mayor en algunas partes del entorno que en otras, debido a la presencia de dicho material en el entorno. Del mismo modo, si el entorno cercano al cable de fibra óptica incluye cables de alimentación u otros conductores significativos que transportan corriente, estos otros conductores en el entorno pueden generar un campo magnético cuando estén operativos.

45 Además, el campo magnético generado por la corriente alterna que fluye en el primer conductor puede, en algunos casos, inducir campos magnéticos secundarios en materiales que pueden estar, al menos parcialmente, magnetizados y la presencia de dichos campos magnéticos secundarios también puede influir en el campo magnético que actúa sobre el primer conductor en uso.

En algunas aplicaciones, como se describirá más adelante, el método puede comprender analizar las señales de medición para detectar cualquier variación que pueda deberse a la intensidad de campo magnético variable localmente. Dicho método puede emplearse como parte de un método de detección de campo magnético, por ejemplo, como parte de un método de detección de material y/o de objetos ferromagnéticos.

50 En algunas realizaciones, el método puede implicar la disposición específica de al menos un segundo elemento que, en uso, genera un campo magnético en la proximidad del primer elemento. En otras palabras, en lugar de confiar (únicamente) en el campo magnético ambiental, por ejemplo, el campo magnético de la Tierra, el método puede utilizar al menos un elemento que se haya dispuesto para aplicar un campo magnético al conductor en uso. La presencia del segundo elemento da como resultado un campo magnético que actúa sobre el primer conductor, que es mayor que el que hubiera sido el caso en la ausencia del segundo elemento, es decir, el campo ambiental debido

al entorno. El aumento de la intensidad total del campo magnético en la proximidad del primer conductor puede aumentar la señal de medición esperada para una magnitud de corriente alterna dada. Por lo tanto, aumentar la intensidad del campo magnético puede aumentar la probable señal detectada (p. ej., mejorar la relación de señal a ruido de la señal de medición) y/o reducir los requisitos de corriente. Además, utilizar un segundo elemento para generar un campo magnético puede permitir conocer/controlar la orientación y/o la fuerza del campo magnético hacia el primer conductor. Si se conoce la orientación y la fuerza del campo magnético, también se puede conocer la fuerza inducida en el primer conductor para una corriente dada, permitiendo así la aplicación de una o más fuerzas conocidas. Como se describirá más adelante, esto puede permitir la calibración del sensor de fibra óptica.

El segundo elemento puede desplegarse de modo que la fibra óptica y el primer conductor (que están acoplados) puedan moverse con respecto al segundo elemento y la libertad de movimiento depende del entorno. Por lo tanto, el segundo elemento puede desplegarse como un elemento separado en el entorno para el primer conductor/fibra óptica.

Por ejemplo, la fibra óptica típicamente será parte de un cable de fibra óptica, es decir, una estructura que incluye una o más fibras ópticas con una cubierta exterior. En algunas realizaciones, el segundo elemento puede estar dispuesto externamente a la estructura del cable de fibra óptica, que puede comprender la fibra óptica sola o tanto la fibra óptica como el primer conductor. El segundo elemento podría desplegarse junto a la estructura del cable, de modo que, en uso, la fuerza inducida en el primer conductor hace que la estructura del cable intente moverse en el entorno.

Sin embargo, en algunas realizaciones, el segundo elemento puede formar parte de la estructura del cable de fibra óptica, con la estructura estando dispuesta para permitir al menos algo de movimiento del primer conductor (y, por lo tanto, de la fibra óptica) con respecto al segundo elemento. Incluir el segundo elemento en la estructura del cable permitirá un fácil despliegue, ya que solo necesita desplegarse un único cable en el entorno. Incluir además el segundo elemento en la misma estructura del cable que el primer conductor, puede evitar cualquier variación significativa en la colocación del primer conductor dentro del campo magnético generado por el segundo elemento. La fuerza inducida por el campo magnético del segundo elemento en el primer conductor, conducirá a una tensión variable en el primer conductor y la fibra óptica, que aún puede depender del entorno. Por ejemplo, la fibra óptica puede desplegarse dentro de un material deformable dentro de la estructura del cable, de modo que el acoplamiento del entorno a la estructura del cable influye en la cantidad de deformación del material deformable.

El segundo elemento puede comprender un material magnético permanente, es decir, un material que crea su propio campo magnético persistente. Por lo tanto, puede haber uno o más imanes permanentes desplegados a lo largo de la longitud de la fibra óptica.

En algunas realizaciones, al menos algunos imanes permanentes pueden acoplarse a la fibra óptica, p. ej., a través de resortes, u otro accesorio elástico similar, que permite al menos algún movimiento entre el imán y la fibra óptica. La presencia de los imanes permanentes aumenta la intensidad del campo magnético en la proximidad del imán, lo que conduce a una mayor señal de medición en dichas ubicaciones. La conexión de los imanes a la fibra óptica (generalmente, al cable de fibra óptica), puede facilitar el despliegue y garantizar el correcto posicionamiento predeterminado del imán permanente con respecto al primer conductor. Como se mencionó, el accesorio, p. ej., el resorte, permitirá el movimiento relativo de la fibra óptica y del imán. Utilizar un resorte, por ejemplo, podría aumentar la sensibilidad a frecuencias específicas en las ubicaciones de los imanes permanentes. La frecuencia de resonancia también puede cambiar con el cambio en los alrededores.

En algunas realizaciones, el segundo elemento puede comprender un segundo conductor a través del cual fluye una corriente en uso. Por lo tanto, el método puede comprender aplicar una corriente a un segundo conductor en la proximidad del primer conductor. El segundo conductor puede estar dispuesto para recorrer a lo largo de al menos parte de la fibra óptica que está acoplada al primer conductor. En algunas realizaciones, el segundo conductor puede estar dispuesto para tener sustancialmente la misma geometría que el primer conductor, por ejemplo, los conductores primero y segundo pueden ser sustancialmente paralelos o desplegarse en la misma trayectoria serpenteante o disposición enrollada. Sin embargo, en otras realizaciones, el segundo conductor puede estar dispuesto a lo largo de al menos parte de la misma trayectoria del primer conductor, pero puede tener una geometría diferente a la del primer conductor, por ejemplo, el primer conductor puede recorrer en una trayectoria que sigue la trayectoria de la fibra óptica, mientras que el segundo conductor puede estar dispuesto en una disposición helicoidal o enrollada.

En uso, se puede aplicar una corriente continua al segundo conductor para proporcionar un campo magnético relativamente constante.

En algunas realizaciones, el método puede comprender variar la magnitud de la corriente continua aplicada al segundo conductor. La magnitud de la corriente continua puede cambiarse, por ejemplo, aumentarse progresivamente incrementando la corriente o incrementando cambios gradualmente. La corriente continua

suministrada puede, por ejemplo, variarse para determinar la corriente más baja requerida que produce una señal de medición aceptable. Alternativamente, la exploración del nivel de corriente continua requerido para una cierta señal de medición puede formar parte de la determinación de la característica del entorno.

5 Cuando el primer y el segundo elemento son ambos conductores, se puede aplicar, alternativamente, una corriente alterna al segundo conductor con una corriente continua aplicada al primer conductor. La aplicación de la corriente alterna al segundo conductor creará, en efecto, un campo magnético variable que, por lo tanto, induce una fuerza variable en el primer conductor (y, por lo tanto, en la fibra óptica) a través del cual fluye una corriente continua. Por lo tanto, la corriente variable se puede aplicar al segundo elemento mientras la corriente del primer conductor se mantiene constante.

10 La aplicación de una corriente continua al primer conductor y la variación de la corriente al segundo conductor, puede asegurar que cualquier efecto del campo magnético de la Tierra se pueda aislar de la señal de medición (que resulta del estímulo variable inducido en la fibra óptica). La corriente continua que fluye en el primer conductor dará lugar a una fuerza inducida en el primer conductor (y, por lo tanto, en la fibra óptica) debido a la presencia del campo magnético de la Tierra. Sin embargo, con una corriente continua aplicada al primer conductor, la fuerza inducida por
15 el campo magnético de la Tierra (que puede considerarse sustancialmente constante) será una fuerza sustancialmente constante. Por lo tanto, la contribución del campo magnético de la Tierra, si es detectable, aparecerá como un desplazamiento de CC en la señal de medición detectada. La variación de la fuerza en el primer conductor, por lo tanto, surgirá principalmente del campo magnético variable generado por el segundo conductor. En algunas realizaciones, aislar los efectos (potencialmente desconocidos) del campo magnético de la Tierra de la
20 señal de medición, puede mejorar la relación de señal a ruido y, por lo tanto, en algunas realizaciones puede ser preferible aplicar una corriente continua al primer conductor.

En otras realizaciones, sin embargo, pueden variarse las corrientes a través de los conductores primero y segundo. Por ejemplo, ambas corrientes podrían ser corrientes alternas con una diferencia de fase predeterminada para inducir una fuerza variable deseada y/o se podrían aplicar corrientes alternas con diferentes frecuencias a los dos
25 conductores para generar una fuerza variable que exhibe latidos.

Cabe señalar que, se podría aplicar una corriente continua al primer conductor acoplado a la fibra óptica para detectar la presencia de cualquier campo magnético variable en el entorno. Por ejemplo, para la detección y/o monitorización de cables de alimentación de CA, se podría aplicar una corriente continua al primer conductor. Si está presente un campo magnético variable, tal como el generado por un cable de alimentación de CA, habrá una fuerza
30 variable inducida en el primer conductor y, por lo tanto, la fibra óptica conducirá a una señal de medición detectable.

El primer conductor puede comprender un conductor alargado, tal como un cable conductor, que recorre la longitud de al menos parte de la fibra óptica, aunque se pueden utilizar otras formas de conductor. En algunas realizaciones, el primer conductor puede tener una sección transversal arqueada y puede estar dispuesto para rodear al menos parcialmente la fibra óptica. El primer conductor podría estar formado con la fibra óptica en una estructura del cable.
35 Se conocen algunas estructuras del cable de fibra óptica que comprenden un manguito metálico que rodea un núcleo de fibra óptica, y el manguito metálico se proporciona como una cubierta protectora para la fibra óptica. Dicho cable podría estar dispuesto con el manguito metálico utilizado para transportar la corriente eléctrica alterna.

Puede haber un primer conductor único que recorre la trayectoria de la fibra óptica y esté acoplado a ella.

40 El primer conductor puede comprender una sección alargada acoplada a la fibra óptica de más de 100 m de longitud o más de 500 m de longitud o más de 1 km de longitud. Preferiblemente, el primer conductor puede recorrer por al menos la longitud de la sección de fibra que se despliega para detectar – que puede tener varios kilómetros de longitud. La aplicación de la corriente alterna al primer conductor, por lo tanto, induce un estímulo en toda la longitud de la fibra en el área de interés. Las señales de medición de una pluralidad de porciones de detección de fibra pueden, por lo tanto, producirse y analizarse para determinar información sobre las características del entorno
45 locales para cada una de las porciones de detección. Por lo tanto, el método proporciona un sensor de fibra óptica distribuido de características del entorno.

Sin embargo, en algunas realizaciones, el primer elemento puede comprender una pluralidad de primeros conductores, cada uno acoplado a la fibra óptica en diferentes ubicaciones a lo largo de su longitud y cada uno dispuesto para recibir una corriente eléctrica en uso. Cada uno de los diferentes primeros conductores puede
50 conectarse a circuitos de accionamiento de corriente individuales, de modo que se pueda aplicar una corriente a cada uno de los conductores individualmente y/o al menos algunos de los conductores pueden conectarse en serie, por ejemplo, mediante cables de conexión adecuados o similares que no estén acoplados a la fibra óptica. De esta manera, se pueden acoplar múltiples secciones diferentes de la fibra óptica a elementos a los que se puede inducir una fuerza.

5 En algunas realizaciones, el primer conductor puede comprender un material magnetoestrictivo, por ejemplo, níquel o acero. Los materiales magnetostrictivos son materiales cuyas dimensiones pueden variar en presencia de un campo magnético. En uso, la corriente aplicada al primer conductor generará un campo magnético que inducirá la magnetoestricción en el material magnetoestrictivo. A medida que varía la corriente, la magnetoestricción también variará, con el resultado de que se aplica una fuerza variable al primer conductor de acuerdo con la corriente variable que puede conducir a una señal de medición detectable. Se podría lograr un efecto similar asegurando que el primer conductor esté acoplado a un material magnetoestrictivo adecuado.

10 En otra realización, el primer elemento puede comprender al menos un elemento magnético sensible a un campo magnético aplicado y el método comprende aplicar la corriente variable para variar el campo magnético que actúa sobre el primer elemento. El elemento magnético sensible a un campo magnético aplicado, es un elemento que experimenta una fuerza en presencia de un campo magnético. El elemento magnético puede comprender un material magnético permanente, es decir, un material que crea su propio campo magnético persistente, y/o puede comprender un material que exhibe paramagnetismo y/o un material que exhibe diamagnetismo. El al menos elemento magnético podría estar incluido dentro de una estructura del cable de fibra óptica con la fibra óptica o acoplado a la fibra óptica.

15 En esta realización, el método puede comprender aplicar una corriente alterna a un segundo elemento para generar un campo magnético variable. El segundo elemento puede comprender un conductor desplegado en la proximidad del elemento magnético y de la fibra óptica. Por ejemplo, el segundo elemento puede comprender un conductor alargado que recorre a lo largo de al menos parte de la longitud de la fibra óptica.

20 Como se describió anteriormente, las realizaciones de la presente invención pueden implicar, por lo tanto, aplicar una corriente variable a un conductor, que puede ser el propio primer elemento o un conductor dispuesto para aplicar un campo magnético variable al primer elemento. En cualquiera de estas realizaciones, uno o más conductores pueden recorrer a lo largo de una longitud significativa de la fibra óptica.

25 Para permitir que una corriente fluya, ambos extremos de un conductor de este tipo deben conectarse a un circuito adecuado. En algunas realizaciones, un extremo del conductor puede estar conectado a un potencial local, por ejemplo, un potencial de tierra o de referencia local en el extremo del conductor. Por lo tanto, la corriente variable, tal como una corriente alterna, puede aplicarse generando una tensión de activación que varía apropiadamente en el otro extremo. Esto puede ser útil cuando el conductor recorre a lo largo de la fibra óptica durante una longitud significativa. Un extremo del conductor (el extremo proximal) puede ubicarse fácilmente cerca del extremo de la fibra óptica que está conectada al interrogador. Por lo tanto, aplicar una tensión de conducción puede ser relativamente fácil de lograr. Sin embargo, el otro extremo del conductor puede ubicarse a una distancia significativa y, en muchos sistemas de detección de fibra óptica, no se requiere que el extremo distal de la fibra esté conectado a algo. Por lo tanto, el extremo distal del conductor se puede conectar a un potencial de referencia local en esa ubicación.

30 Sin embargo, en algunas realizaciones, un conductor, por ejemplo, un conductor que forma el primer elemento, puede estar conectado o formar parte de un conductor que duplica el extremo proximal de la fibra, de modo que ambos extremos del circuito están disponibles en el extremo proximal de la fibra.

En tal disposición, se debe tener cuidado con la disposición de las diversas trayectorias de corriente.

35 Por ejemplo, considere un primer conductor acoplado a la fibra óptica. En uso, el primer conductor puede formar parte de una primera trayectoria de corriente desde un circuito de accionamiento adecuado hasta el extremo de la fibra óptica. También puede haber una segunda trayectoria de corriente desde el extremo de la fibra óptica hasta el circuito de accionamiento. Se apreciará que, como la primera trayectoria de corriente y la segunda trayectoria de corriente, de parte de una trayectoria de corriente general, y recorren, generalmente, en direcciones opuestas, la corriente que fluye en la primera trayectoria de corriente en cualquier momento fluirá, generalmente, en la dirección opuesta a la corriente en la segunda trayectoria de corriente y será de magnitud sustancialmente similar. Por lo tanto, cualquier fuerza inducida en la primera trayectoria de corriente en presencia de un campo magnético externo será sustancialmente opuesta a la inducida en la segunda trayectoria de corriente.

40 Por lo tanto, la segunda trayectoria de corriente debe estar sustancialmente desacoplada mecánicamente de la primera trayectoria de corriente. En otras palabras, el primer conductor de la primera trayectoria de corriente debería poder moverse libremente en el entorno con respecto a la segunda trayectoria de corriente. Se entenderá que la primera trayectoria de corriente y la segunda trayectoria de corriente se conectarán en algún punto o a través de alguna trayectoria de corriente intermedia y, por lo tanto, habrá un cierto grado de acoplamiento entre los conductores que forman las trayectorias de corriente en este punto, pero lejos de dicha zona de transición las trayectorias de corriente están sustancialmente desacopladas, como se describe.

45 En algunas realizaciones, la segunda trayectoria de corriente puede estar dispuesta lo suficientemente lejos de la primera trayectoria de corriente para no interferir sustancialmente con la fuerza inducida en la primera trayectoria de

corriente (es decir, el primer conductor) en uso. Se apreciará que, en uso, una corriente fluirá en la segunda trayectoria de corriente siempre que una corriente también fluya en la primera trayectoria de corriente. La corriente que fluye en la segunda trayectoria de corriente generará un campo magnético. Por lo tanto, la segunda trayectoria de corriente puede eliminarse lo suficiente de la primera trayectoria de corriente de modo que, en la primera trayectoria de corriente, cualquier contribución al campo magnético desde la segunda trayectoria de corriente sea menor que la contribución de otras fuentes – tal como el campo magnético ambiental y/o cualquier segundo elemento desplegado específicamente para producir un campo magnético en el primer conductor, como se describió anteriormente.

Por lo tanto, por ejemplo, en la realización en la que el método se basa en el campo magnético de la Tierra que induce una fuerza en el primer conductor en uso, la segunda trayectoria de corriente debe ubicarse lo suficientemente lejos del primer conductor para que cualquier contribución de la segunda trayectoria de corriente (en el primer conductor) sea menor que la del campo magnético de la Tierra. Por ejemplo, en un cable que transporta corriente de 3 A, la intensidad del campo magnético es aproximadamente equivalente al de la Tierra a una distancia de aproximadamente 7,5 mm. Por lo tanto, la segunda trayectoria de corriente puede estar dispuesta para estar mucho más lejos que esta distancia de la primera trayectoria de corriente, por ejemplo, al menos unos pocos centímetros.

Sin embargo, en otra realización, la segunda trayectoria de corriente puede estar dispuesta de modo que el campo magnético generado por la segunda trayectoria de corriente se utilice deliberadamente para al menos ayudar a generar la fuerza variable en el primer conductor. En otras palabras, considerando las realizaciones descritas anteriormente con ambos conductores primero y segundo, los conductores primero y segundo podrían estar conectados eléctricamente para formar parte del mismo circuito. En otras palabras, el primer conductor puede formar al menos parte de la primera trayectoria de corriente y el segundo conductor puede formar al menos parte de la segunda trayectoria de corriente.

En esta realización, la corriente que fluye en el primer conductor será, por lo tanto, generalmente en la dirección opuesta a la corriente que fluye en el primer conductor (dependiendo del despliegue exacto de las dos trayectorias de corriente). Como ejemplo, los conductores primero y segundo pueden ser sustancialmente paralelos entre sí. Como la corriente en ambos conductores varía, la fuerza inducida en el primer conductor también variará. En esta disposición, la fuerza entre los conductores primero y segundo siempre puede ser repulsiva y cuando se aplica una corriente alterna con una frecuencia definida, la señal de medición corresponderá al doble de la frecuencia aplicada.

Cualquiera que sea la disposición espacial de la segunda trayectoria de corriente con respecto a la primera trayectoria de corriente, las dos trayectorias de corriente pueden comprender diferentes secciones de un único conductor alargado, tal como un cable. Por ejemplo, parte del cable conductor podría unirse a o desplegarse dentro de la estructura del cable de fibra óptica para proporcionar la primera trayectoria de corriente. El cable conductor puede emerger del cable de fibra óptica en algún punto y volver al inicio de la fibra para proporcionar la segunda trayectoria de corriente. Alternativamente, la segunda trayectoria de corriente puede proporcionarse por uno o más conductores que están conectados eléctricamente al primer conductor.

Por lo tanto, las realizaciones descritas anteriormente, inducen una fuerza variable en un primer elemento que está acoplado a la fibra óptica. Esto dará como resultado que al menos alguna fuerza se imparta a la fibra óptica de una manera que puede detectarse fácilmente para proporcionar una señal de medición. Preferiblemente, el método comprende generar una señal de medición a partir de una pluralidad de porciones de detección de dicha fibra. Como se describió anteriormente, el primer elemento puede ser alargado y extenderse por una longitud considerable de la fibra – por lo tanto, en uso, se puede inducir una fuerza sobre una longitud considerable de fibra que puede interrogarse para proporcionar una pluralidad de porciones de detección. Por lo tanto, cada una de las porciones de detección generará una señal de medición indicativa de la variación en la radiación retrodispersada correspondiente a dicha corriente eléctrica aplicada para esa porción de detección. Por lo tanto, el método proporciona un sensor de fibra óptica de entorno distribuido.

Las señales de medición pueden generarse utilizando técnicas de detección acústica distribuida y, por lo tanto, el método puede comprender interrogar la fibra y analizar la retrodispersión detectada para proporcionar una detección acústica distribuida cuando se aplica dicha corriente alterna.

Como se mencionó anteriormente, la o las señales de medición se pueden utilizar para proporcionar información sobre el entorno en el que se encuentra la fibra óptica. Por lo tanto, el método comprende analizar al menos una señal de medición para determinar la impedancia mecánica del entorno en el que se despliega la sección correspondiente de fibra óptica, es decir, la resistencia del entorno al movimiento.

Por ejemplo, si la fibra óptica está relativamente sin restricciones por el entorno, la fuerza inducida en el primer elemento y, por lo tanto, la fibra óptica, puede conducir a una primera señal de medición. Sin embargo, si la fibra óptica está bien enterrada o restringida por el entorno, la libertad de movimiento de la fibra óptica también puede

verse limitada y, por lo tanto, la respuesta detectada a la fuerza variable puede tener una característica diferente, tal como un nivel de señal de medición reducido. Por lo tanto, una parte de una fibra que se despliega en el suelo, pero relativamente sin restricciones, puede generar una señal de medición diferente a una parte de una fibra que se sumerge en agua o se entierra. Además, una parte de una fibra que está ligeramente enterrada, por ejemplo en arena, puede generar una señal diferente a una fibra que está bien enterrada, por ejemplo, en arcilla pesada como tierra. Por lo tanto, al observar la señal de medición que indica la variación detectada en la radiación retrodispersada, es posible determinar una indicación de la impedancia del entorno en el que se despliega la fibra. Por ejemplo, las secciones de la fibra que exhiben un primer nivel de señal de medición en respuesta a la corriente eléctrica variable aplicada, pueden corresponder a áreas de impedancia relativamente baja y las secciones de la fibra que exhiben un segundo nivel de señal de medición diferente, pueden corresponder a áreas de impedancia relativamente alta.

Una medida de la impedancia puede ser útil en una serie de aplicaciones diferentes. Por ejemplo, una fibra óptica se puede integrar dentro de una estructura para proporcionar monitorización estructural. Detectar un cambio significativo en la impedancia a lo largo del tiempo, podría indicar que la condición de la estructura está cambiando. Una fibra desplegada a lo largo del suelo, por ejemplo, a lo largo de la ruta de un enlace de transporte, tal como una carretera o una vía ferroviaria, podría monitorizarse para detectar cualquier cambio significativo en la impedancia que pudiera indicar que la fibra se ha cubierto, por ejemplo, como resultado de una nevada significativa, deslizamiento de tierra o cubierta de arena, dependiendo de la ubicación general. La detección del cubrimiento de la fibra óptica puede indicar una obstrucción potencial del enlace de transporte. Una fibra óptica que se despliega en el suelo o que está enterrada libremente en el suelo, o desplegada en una cavidad que está abierta al entorno, puede monitorizarse para detectar un cambio de impedancia debido a estar sumergida en agua, lo que sirve a un detector para encharcamiento o inundación.

Adicional o alternativamente, el método puede utilizarse para determinar las propiedades magnéticas del entorno, es decir, la característica del entorno son las propiedades magnéticas locales. Como se describió anteriormente, en realizaciones que dependen predominantemente de un campo magnético local que actúa sobre el primer elemento, cualquier variación en la intensidad del campo magnético local puede conducir a diferentes señales de medición. Estas variaciones pueden deberse a la presencia de materiales magnéticos o permanentes, o cables de alimentación o similares, o la presencia de objetos en los que se induce un campo magnético secundario. Por lo tanto, para la detección se puede emplear un sensor, de acuerdo con este aspecto de la invención, por ejemplo, para detectar la presencia de objetos metálicos y/o ferromagnéticos y/o cables de alimentación u otros conductores. Adicional o alternativamente, el método puede comprender monitorizar cualquier variación en las características magnéticas locales. La monitorización de cualquier cambio en las propiedades magnéticas puede ser útil en la monitorización de estructuras que comprenden elementos metálicos, tal como vigas estructurales o vías de ferrocarril, por ejemplo. La contribución al campo ambiental del elemento metálico, p. ej., viga o vía, puede cambiar si, por ejemplo, el elemento se agrieta. Esto puede resultar en un cambio en las propiedades del campo local que pueden detectarse. Del mismo modo, las contribuciones magnéticas de cables de alimentación podrían monitorizarse para detectar cualquier perturbación indicativa un problema potencial.

El método puede comprender comparar diferentes señales de medición de diferentes partes de la fibra óptica, y/o señales de medición de una sección dada de la fibra óptica adquirida en diferentes momentos, para dar una medida relativa de la característica del entorno. Por ejemplo, las señales de medición podrían compararse para determinar si una parte de la fibra está dentro de un entorno de impedancia relativamente más alta que otra área y/o si la impedancia relativa de una sección determinada de fibra ha cambiado con el tiempo. Esto podría ser útil, por ejemplo, para detectar si las condiciones del entorno han cambiado.

El método puede comprender adicional o alternativamente, analizar la señal de medición de una sección dada de fibra para estimar la característica del entorno presente. Por ejemplo, en algunas realizaciones, las señales de medición detectadas cuando se aplica la corriente alterna, pueden compararse con una característica de señal conocida o esperada. Como se describió anteriormente, en algunas realizaciones, el paso de aplicar la corriente eléctrica alterna puede dar como resultado que se induzca una fuerza relativamente bien conocida en el primer elemento y la fibra óptica. Si se conoce el grado de fuerza aplicada, al menos con cierta precisión, también se puede conocer la variación esperada en la respuesta de la fibra óptica en ciertas condiciones del entorno, p. ej., la variación esperada si la fibra óptica se coloca sobre un terreno plano y sin restricciones. Comparando la respuesta real, es decir, la señal de medición detectada, con la respuesta esperada, puede proporcionar una indicación de las características absolutas del entorno.

La fibra óptica con el primer elemento, puede desplegarse principalmente como un sensor del entorno, es decir, el sensor se interroga principalmente con la corriente variable aplicada (para determinar las características del entorno) y no se interroga normalmente sin la corriente variable aplicada. La corriente variable, por ejemplo, alterna puede aplicarse de forma continua o periódica (según sea necesario) para adquirir señales de medición.

Sin embargo, en algunas realizaciones, la fibra óptica puede utilizarse para al menos una función de detección adicional. Por ejemplo, la fibra óptica podría interrogarse sin que la corriente variable sea aplicada para proporcionar al menos una primera función de detección y podría interrogarse por separado con la corriente variable aplicada para determinar la característica del entorno. La primera función de detección puede comprender convenientemente la detección acústica distribuida. En esta realización, los pasos de interrogar la fibra pueden ser sustancialmente los mismos con y sin la corriente variable aplicada. Por lo tanto, la fibra óptica puede interrogarse sin la corriente variable aplicada para medir las señales acústicas que inciden en la fibra óptica. Periódicamente, sin embargo, la corriente variable, por ejemplo, alterna, podría aplicarse para permitir la determinación de las características del entorno. Sin embargo, en algunas aplicaciones, la primera función de detección puede comprender alguna otra función de detección, tal como la detección de temperatura distribuida (DTS, por sus siglas en inglés), por ejemplo. Por lo tanto, el método puede comprender interrogar la fibra óptica para proporcionar la DTS sin la corriente variable aplicada y aplicar periódicamente la corriente variable e interrogar la fibra óptica para proporcionar una señal de medición utilizando técnicas de tipo DAS. Esto puede implicar variar la forma de la radiación de interrogación y/o el procesamiento entre la implementación de la primera función de detección y la detección de las características del entorno.

Cuando la fibra óptica se utiliza para una primera función de detección, además de la detección de la característica del entorno, la determinación de la característica del entorno se puede utilizar para calibrar las mediciones de la primera función de detección para la variación en las propiedades del entorno. Por ejemplo, para un sensor de DAS, la impedancia mecánica del entorno puede estar relacionada con la respuesta del sensor a un estímulo acústico dado. Así, si la fibra óptica de detección se despliega, de tal manera que las propiedades del entorno local varían a lo largo de la fibra, entonces las señales de DAS detectadas a partir de un estímulo dado también pueden variar a lo largo de la fibra. Realizar el método de la presente invención para determinar variaciones en las propiedades del entorno locales puede permitir una calibración relativa entre diversas secciones de la fibra. Detectar periódicamente las características del entorno también puede permitir que se calibren las variaciones en el entorno a lo largo del tiempo. Por ejemplo, una fibra desplegada en el suelo o enterrada en el suelo puede mostrar una respuesta, diferente dependiendo de cómo de seco o de húmedo esté el suelo, si el suelo está congelado y/o si hay nieve en el suelo. Todas estas condiciones pueden determinarse realizando una detección del entorno, de acuerdo con los métodos descritos anteriormente.

La calibración puede ser una calibración relativa, por ejemplo, determinando cualquier cambio relativo en la característica del entorno a lo largo del tiempo en una ubicación dada y/o cualquier variación entre las porciones de detección de la fibra con la corriente variable aplicada. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, en algunas realizaciones, donde se conoce el campo magnético aplicado al primer elemento y, por lo tanto, la fuerza inducida, la calibración podría ser una calibración absoluta.

Esto significa que una fibra desplegada en un entorno de interés se puede calibrar fácilmente. Al utilizar los métodos de la presente invención, se puede aplicar un estímulo conocido a al menos una sección de la fibra óptica, que puede comprender sustancialmente la totalidad de la fibra de detección. El estímulo se aplica induciendo la fuerza sobre el primer elemento y, por lo tanto, puede aplicarse a toda la fibra simultáneamente aplicando la corriente variable. Esto puede requerir acceso solamente a un extremo de la fibra óptica.

Por lo tanto, el método puede comprender determinar las señales de medición, como se describió anteriormente, y analizar las señales de medición para determinar el factor de calibración a ser aplicado a una o más detecciones de la porción de la fibra óptica cuando se utiliza para una función de detección adicional.

En algunas realizaciones, donde la corriente variable es una corriente alterna, el método puede comprender variar al menos una de la frecuencia y/o de la magnitud de la corriente alterna aplicada. Variar la frecuencia y/o la magnitud de la corriente alterna puede ayudar a identificar la señal de medición debido a la fuerza inducida en el primer elemento y, por lo tanto, en la fibra óptica. Por ejemplo, las señales de radiación de retrodispersión podrían correlacionarse con un barrido de frecuencia utilizado. Adicional o alternativamente, sin embargo, variar la frecuencia de la corriente alterna puede proporcionar información adicional sobre las propiedades del entorno. Por ejemplo, los armónicos pueden estar presentes en las señales de medición en ciertas frecuencias que pueden estar relacionadas con propiedades del entorno. Por lo tanto, analizar al menos una señal de medición puede comprender aplicar análisis de frecuencia a la señal de medición.

La frecuencia de la corriente alterna, sea variable o no, en uso, puede elegirse para proporcionar señales de medición detectables con una buena relación de señal a ruido. La amplitud de la señal de medición puede disminuir al aumentar la frecuencia, por ejemplo, debido a la inercia del cable de fibra óptica. Por lo tanto, la frecuencia de la corriente alterna puede ser igual o inferior a 300 Hz, es decir, igual o inferior a 100 Hz. Sin embargo, las bajas frecuencias pueden ser más ruidosas. Por lo tanto, la frecuencia de la corriente alterna puede ser igual o superior a 1 Hz o, por ejemplo, igual o superior a 10 Hz.

Lo anterior se ha descrito en términos de determinar las propiedades inherentes del entorno, tales como la impedancia mecánica. Sin embargo, en algunas realizaciones, el método se puede utilizar para proporcionar capacidad de detección adicional utilizando un material cuyas propiedades varían de acuerdo con un parámetro que se desea detectar para modificar las características del entorno de la fibra óptica. Por lo tanto, por ejemplo, el material óptico y el primer material pueden desplegarse dentro o acoplarse a un material cuya impedancia varía de acuerdo con un primer parámetro que se desea monitorizar. El primer parámetro podría ser, por ejemplo, temperatura, humedad, radiación de UV o presión. Por ejemplo, el material podría comprender un gel cuya viscosidad varía con la temperatura o un material de polímero cuya flexibilidad varía con la exposición a UV. El material puede ser material químicamente sensible que reacciona a sustancias químicas particulares, por ejemplo, para detectar fugas de sustancias químicas. El material podría ser sensible a la radiación ionizante para actuar como un detector de radiación. En algunas realizaciones, el cambio en la impedancia podría estar bien definido con respecto al primer parámetro, por ejemplo, un cambio en la viscosidad podría producirse a una temperatura bien definida (como la cera de fusión, por ejemplo), que permitiría su utilización como punto de calibración.

Por lo tanto, la fibra óptica se despliega, al menos en una ubicación, acoplada a o dentro de un material cuyas propiedades de impedancia, es decir, rigidez, viscosidad, flexibilidad, etc., varían de acuerdo con el parámetro deseado. En uso, la fibra óptica se interroga, como se describió anteriormente, para determinar la impedancia del entorno – que está determinada por las propiedades del primer material, que a su vez depende del parámetro detectado. Por lo tanto, en algunas realizaciones, la fibra óptica y el primer elemento se pueden acoplar a un material cuyas propiedades varían de acuerdo con un primer parámetro para modificar las características del entorno de la fibra óptica. El método comprende determinar la impedancia del entorno y, por lo tanto, proporcionar una indicación del primer parámetro.

Por lo tanto, en general, el método implica el acoplamiento de una fibra óptica a un primer elemento que es sensible, en uso, a un campo electromagnético aplicado y suministra una corriente alterna a un conductor, que puede o no formar parte del primer elemento, para inducir una fuerza en el primer elemento y, por lo tanto, la fibra. Al generar una fuerza en la fibra, se puede determinar información in situ sobre la impedancia del entorno.

Proporcionar un sensor de impedancia es un aspecto de la presente invención.

Un método de ejemplo de detección magnética, comprende interrogar una fibra óptica con radiación para proporcionar detección acústica distribuida, mientras se aplica una corriente a un conductor acoplado a la fibra óptica. En presencia de cualquier campo magnético, se inducirá una fuerza en el conductor y, por lo tanto, en la fibra óptica. La corriente aplicada puede ser una corriente variable, como se describió anteriormente, lo que permite la detección/monitorización de campos magnéticos, incluyendo campos magnéticos estáticos o sustancialmente constantes. Sin embargo, si una aplicación solo requiere la detección de campos magnéticos variables o dinámicos, se podría aplicar una corriente continua al conductor.

En particular, el método de detección magnética puede utilizarse para la detección de objetos. El método de detección magnética también se puede utilizar para la monitorización estructural de estructuras metálicas.

Otro aspecto de la invención se refiere a un método para detectar un primer parámetro en una ubicación de interés, que comprende desplegar una fibra óptica en el área de interés, en donde la fibra óptica se acopla a un primer elemento sensible al campo electromagnético y también se acopla a, o se despliega en el interior de, un primer material que tiene al menos una propiedad de impedancia que varía de acuerdo con dicho primer parámetro, e interrogar dicha fibra óptica con radiación para proporcionar detección acústica distribuida, mientras se aplica una corriente variable para inducir una fuerza en el primer elemento.

La invención también se refiere a un sensor de acuerdo con la reivindicación 17.

El aparato de acuerdo con este aspecto de la invención ofrece todas las mismas ventajas y se puede utilizar de todas las maneras descritas anteriormente.

En particular, el primer elemento puede comprender un primer conductor. El aparato puede estar dispuesto de modo que fluya una corriente en el primer conductor en uso.

El circuito eléctrico puede estar configurado para generar la corriente variable, por ejemplo, una corriente eléctrica alterna en el primer conductor. Como se describió anteriormente, el aparato sensor puede basarse en un campo magnético ambiental para generar una fuerza en el primer conductor cuando fluye la corriente alterna. Sin embargo, en algunas realizaciones, el aparato sensor puede comprender al menos un segundo elemento que, en uso, genera un campo magnético en la proximidad del primer elemento. El segundo elemento puede formar parte de una estructura del cable de fibra óptica con la fibra óptica y el primer conductor, estando la estructura configurada para permitir al menos algo de movimiento del primer conductor con respecto al segundo elemento. El segundo elemento puede comprender un material magnético permanente, por ejemplo, uno o más imanes permanentes desplegados a

- lo largo de la longitud de la fibra óptica y del primer conductor. En algunas realizaciones, el segundo elemento comprende un segundo conductor. El aparato sensor puede comprender un circuito eléctrico para generar una corriente en el segundo conductor para generar un campo magnético. El aparato sensor puede estar configurado para generar una corriente continua en el segundo conductor y una corriente alterna en el primer conductor.
- 5 Alternativamente, se puede generar una corriente continua en el primer conductor y generarse una corriente alterna en el segundo conductor.
- El primer conductor puede ser un conductor alargado, tal como un cable conductor, que recorre a lo largo de al menos parte de la fibra óptica. El primer conductor puede tener una sección transversal arqueada y puede, por ejemplo, rodear al menos parcialmente la fibra óptica.
- 10 El primer conductor puede estar formado con la fibra óptica en una estructura del cable.
- El primer conductor puede comprender una sección alargada acoplada a la fibra óptica de más de 1 km de longitud.
- En algunas realizaciones, el primer elemento puede comprender una pluralidad de primeros conductores, cada uno acoplado a la fibra óptica en diferentes ubicaciones a lo largo de su longitud y cada uno dispuesto para recibir una corriente eléctrica en uso.
- 15 En una realización, el primer elemento comprende al menos un elemento magnético sensible a un campo magnético aplicado. El circuito eléctrico puede estar dispuesto para generar la corriente variable, por ejemplo, una corriente alterna, para variar el campo magnético que actúa sobre el primer elemento. El elemento magnético puede comprender al menos uno de: material magnético permanente; un material que exhibe paramagnetismo o un material que exhibe diamagnetismo. Dicho al menos un elemento magnético puede incorporarse en una estructura
- 20 del cable de fibra óptica con la fibra óptica. La corriente alterna se puede aplicar a un segundo elemento para generar un campo magnético variable. El segundo elemento puede comprender un conductor desplegado en la proximidad del elemento magnético y de la fibra óptica. La unidad interrogadora y el procesador pueden estar configurados para generar una señal de medición a partir de una pluralidad de porciones de detección de dicha fibra. La unidad interrogadora puede ser una unidad interrogadora de detección acústica distribuida.
- 25 El procesador puede estar dispuesto para analizar las señales de medición, de acuerdo con cualquiera de los métodos descritos anteriormente.
- El procesador está configurado para determinar la impedancia mecánica del entorno. El procesador puede estar configurado para determinar las propiedades magnéticas locales del entorno, por ejemplo, para detectar objetos tales como: objetos metálicos, objetos ferromagnéticos o conductores.
- 30 El procesador puede estar dispuesto para realizar monitorización estructural y la fibra óptica puede integrarse dentro de o adyacente a una estructura para proporcionar monitorización estructural.
- La unidad interrogadora y el procesador pueden estar configurados para interrogar la fibra óptica sin la corriente alterna aplicada para realizar una primera función de detección. El procesador puede estar configurado para calibrar el resultado de la primera función de detección en base a la señal de medición adquirida cuando se aplica la
- 35 corriente variable. El procesador puede estar configurado para analizar las señales de medición para determinar un factor de calibración que se aplicará a una o más detecciones de porciones de la fibra óptica cuando se utiliza para la primera función de detección.
- El circuito eléctrico puede estar configurado para aplicar corriente alterna como la corriente variable. El circuito eléctrico puede estar configurado para variar al menos una de la frecuencia y/o de la magnitud de la corriente alterna aplicada. El procesador puede estar configurado para correlacionar las señales de medición con una modulación de
- 40 frecuencia de la corriente alterna.
- La fibra óptica y el primer elemento también pueden acoplarse a un material cuyas propiedades varían de acuerdo con un primer parámetro para modificar las características del entorno de la fibra óptica. El primer parámetro puede ser uno de, por ejemplo, temperatura, humedad, radiación UV o presión. El procesador puede estar configurado para
- 45 determinar la impedancia del entorno y utilizar la impedancia como una indicación del primer parámetro.
- En algunas realizaciones, el primer elemento puede comprender una pluralidad de primeros conductores, cada uno acoplado a la fibra óptica en diferentes ubicaciones a lo largo de su longitud.
- El cable puede comprender adicionalmente un segundo elemento que, en uso, genera un campo magnético en la proximidad del primer elemento, estando la estructura configurada para permitir al menos un cierto movimiento del
- 50 primer conductor con respecto al segundo elemento. El segundo elemento puede comprender un material magnético

permanente, por ejemplo, uno o más imanes permanentes desplegados a lo largo de la longitud de la fibra óptica y del primer conductor. En algunas realizaciones, el segundo elemento comprende un segundo conductor.

5 En una realización, el primer elemento comprende al menos un elemento magnético sensible a un campo magnético aplicado. El elemento magnético puede comprender al menos uno de: material magnético permanente; un material que exhibe paramagnetismo o un material que exhibe diamagnetismo. El cable puede comprender además un segundo elemento que, en uso, genera un campo magnético variable. El segundo elemento puede comprender un conductor.

10 La fibra óptica y el primer elemento también pueden acoplarse a un material cuyas propiedades varían de acuerdo con un primer parámetro para modificar las características del entorno de la fibra óptica. El primer parámetro puede ser uno de, temperatura, humedad, radiación UV o presión. El procesador puede estar configurado para determinar la impedancia del entorno y utilizar la impedancia como una indicación del primer parámetro.

En general, la invención se refiere la utilización de una corriente variable para generar una fuerza variable en una fibra óptica de un sensor de fibra óptica al inducir una fuerza variable en una respuesta del primer elemento a campos electromagnéticos que se acopla a dicha fibra óptica.

15 La invención se describirá ahora solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, para los cuales:

La Figura 1 ilustra un aparato de sensor de DAS convencional;

La Figura 2 ilustra una realización de la presente invención;

La Figura 3 ilustra la detección de impedancia, de acuerdo la invención;

La Figura 4 ilustra diversas realizaciones de una fibra óptica acoplada a un conductor;

20 La Figura 5 ilustra la detección de campo magnético, de acuerdo con una realización de la invención;

La Figura 6 ilustra una realización de la presente invención con un elemento magnético para crear un campo magnético en el conductor;

La Figura 7 ilustra otra realización con un elemento magnético para crear un campo magnético en el conductor;

La Figura 8 ilustra una realización con material magnético acoplado a la fibra óptica;

25 Las Figuras 9a y 9b muestran los resultados de la amplitud de la señal de medición en función de la frecuencia de la corriente alterna suministrada;

La Figura 10 muestra un espectrograma de la señal de medición de una única porción de detección de la fibra óptica; y

30 Las Figuras 11a y 11b muestran histogramas de potencia en dos bandas de frecuencia obtenidas en presencia de un viga de metal

Las realizaciones de la presente invención utilizan las técnicas de detección acústica distribuida de fibra óptica para proporcionar detección y/o monitorización de las características del entorno dentro del cual se despliega una fibra de detección.

35 La Figura 1 muestra un esquema de una disposición de detección de fibra óptica distribuida convencional. Una longitud de la fibra 104 de detección está conectada de manera extraíble en un extremo a un interrogador 106. La salida del interrogador 106 se pasa a un procesador 108 de señal, que puede estar ubicado junto con el interrogador o puede ser remoto y, opcionalmente, una pantalla 110 de interfaz de usuario/gráfica, que en la práctica puede realizarse mediante un PC debidamente especificado. La interfaz de usuario puede ubicarse junto con el procesador de señal o puede ser remota.

40 La fibra 104 de detección puede tener muchos kilómetros de longitud y puede tener, por ejemplo, 40 km o más de longitud. La fibra de detección puede ser una fibra óptica monomodo no modificada estándar, tal como la que se utiliza habitualmente en aplicaciones de telecomunicaciones sin la necesidad de sitios de reflexión introducidos deliberadamente, tal como una rejilla de Bragg de fibra o similares. La capacidad de utilizar una longitud no modificada de la fibra óptica estándar para proporcionar medios de detección, significa que se puede utilizar fibra
45 disponible fácilmente de bajo costo. Sin embargo, en algunas realizaciones, la fibra puede comprender una fibra que

se ha fabricado para ser especialmente sensible a vibraciones incidentes. En uso, la fibra 104 se despliega en un área de interés a ser monitorizada.

En funcionamiento, el interrogador 106 inicia la interrogación de la radiación electromagnética, que puede comprender, por ejemplo, una serie de pulsos ópticos, que tienen un patrón de frecuencia seleccionado, en la fibra de detección. Los pulsos ópticos pueden tener un patrón de frecuencia, como se describe en la publicación de patente de Reino Unido GB2,442,745, aunque los sensores de DAS que se basan en un solo pulso de interrogación también son conocidos y pueden utilizarse. Señalar que, tal como se utiliza en el presente documento, el término "óptico" no está restringido al espectro visible y la radiación óptica incluye radiación infrarroja y radiación ultravioleta. Como se describe en el documento GB2,442,745 el fenómeno de la retrodispersión de Rayleigh hace que una fracción de la luz ingresada en la fibra se refleje de vuelta al interrogador, donde se detecta que proporciona una señal de salida que es representativa de las perturbaciones acústicas en la proximidad de la fibra. El interrogador, por lo tanto, comprende convenientemente al menos un láser 112 y al menos un modulador 114 óptico para producir una pluralidad de pulsos ópticos separados por una diferencia de frecuencia óptica conocida. El interrogador también comprende al menos un fotodetector 116 dispuesto para detectar la radiación que es Rayleigh retrodispersada desde los sitios de dispersión intrínseca dentro de la fibra 104. Un sensor de DAS de retrodispersión de Rayleigh es muy útil en realizaciones de la presente invención, pero los sistemas basados en la dispersión de Brillouin o de Raman son también conocidos y podría utilizarse en realizaciones de la invención.

La señal del fotodetector se procesa por el procesador 108 de señal. El procesador de señal demodula convenientemente la señal devuelta en base a la diferencia de frecuencia entre los pulsos ópticos, por ejemplo, como se describe en el documento GB2,442,745. El procesador de señal también puede aplicar un algoritmo de desenvolvimiento de fase, como se describe en el documento GB2,442,745. Se puede monitorizar la fase de la luz retrodispersada desde varias secciones de la fibra óptica. Por lo tanto, se puede detectar cualquier cambio en la longitud de la trayectoria óptica efectiva dentro de una sección dada de la fibra, tal como los debidos a ondas de presión incidentes que causan tensión en la fibra.

La forma de la entrada óptica y el método de detección permiten que una sola fibra continua se resuelva espacialmente en porciones de detección longitudinales discretas. Es decir, la señal acústica detectada en una porción de detección puede proporcionarse de manera sustancialmente independiente de la señal detectada en una porción adyacente. Dicho sensor puede verse como un sensor completamente distribuido o intrínseco, ya que utiliza la dispersión intrínseca procesada inherente a una fibra óptica y, por lo tanto, distribuye la función de detección en toda la fibra óptica. La resolución espacial de las porciones de detección de la fibra óptica puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 10 m, lo que para una longitud continua de fibra del orden de 40 km, proporciona aproximadamente 4000 canales acústicos independientes desplegados a lo largo de los 40 km de fibra.

Las realizaciones de la presente invención utilizan el principio de DAS para detectar una señal de medición a partir de porciones de detección de la fibra óptica en respuesta a un estímulo. Sin embargo, en las realizaciones de la presente invención, el estímulo no se transmite acústicamente a la fibra óptica a través del entorno, sino que se genera utilizando la interacción de campos electromagnéticos para inducir una fuerza en un primer elemento que está acoplado mecánicamente a la fibra óptica. La respuesta de la fibra óptica a dicho estímulo y/o la intensidad del propio estímulo, depende de las características del entorno y, por lo tanto, analizando las señales de medición a partir de las porciones de detección de la fibra óptica a medida que el estímulo se aplica, se puede determinar información sobre el entorno en el que se despliega la fibra óptica.

La Figura 2 ilustra una primera realización de la presente invención. La Figura 2 ilustra una fibra 104 óptica conectada a un interrogador 201, que puede comprender como un interrogador de DAS, como se describió anteriormente. La fibra 104 óptica puede tener varios kilómetros de longitud.

Acoplado mecánicamente a la fibra óptica está un primer elemento que es sensible, en uso, a campos electromagnéticos. En la realización mostrada en la Figura 2, el primer elemento es un conductor 202 alargado que está acoplado a al menos parte de la fibra 104 óptica. La sección 203 indica la sección en la que la fibra 104 óptica y el conductor 202 están acoplados mecánicamente entre sí. La sección 203 puede tener varios kilómetros de longitud y puede comprender toda la longitud de la fibra óptica que se utiliza para la detección de fibra óptica.

El conductor 202 alargado está conectado a un circuito 204 de accionamiento que es capaz de generar una corriente, I , variable dentro del conductor alargado. El circuito 204 de accionamiento puede estar separado del interrogador 201, pero en algunas realizaciones, el interrogador 201 y el circuito 204 eléctrico pueden implementarse en una única unidad 205 de control. Para completar el circuito eléctrico, el extremo distante del conductor 204 puede conectarse a un potencial de referencia local, tal como una conexión a tierra, o puede haber una trayectoria (no mostrada) de conductor de retorno al circuito 204.

Cuando la corriente I , que ventajosamente puede ser una corriente alterna, pasa a través del conductor 202 en presencia de un campo magnético, se generará una fuerza en el conductor, como entenderá un experto en la

técnica. Para fines de la ilustración, la Figura 2 muestra una vista en planta de la fibra 104 óptica y del conductor 202, y muestra la fibra 104 óptica y el conductor 202 que recorren en una línea generalmente recta de izquierda a derecha. Para fines de la ilustración, se muestra un campo B magnético con una dirección de campo en el plano de la página. A medida que se aplica una corriente alterna, la dirección de la corriente variará, en la frecuencia de CA, de fluir de izquierda a derecha a fluir en la dirección opuesta. Este flujo de corriente en el conductor 202, por lo tanto, conducirá a una fuerza F en el conductor que varía de acuerdo con la corriente de CA y que, en esta ilustración, será en una dirección en el plano de papel. La fuerza variará de ser en la dirección de arriba a abajo a la dirección opuesta.

El efecto de la fuerza será, por lo tanto, aplicar una tensión variable de lado a lado en el conductor 202, es decir, el conductor 202 será impulsado a moverse de lado a lado. El conductor 202 está acoplado mecánicamente a la fibra 104 óptica, de una manera tal que la fuerza sobre el conductor también da como resultado una fuerza sobre la fibra óptica. Por lo tanto, la fibra óptica también se induce a moverse.

La generación de la corriente alterna (es decir, la corriente variable) en el conductor 202, por lo tanto, da como resultado un estímulo de vibración/tensión que se aplica al conductor y también a la fibra 104 óptica, que puede detectarse por el interrogador 106 de DAS.

Las señales de medición detectadas mientras se aplica la corriente, se pueden utilizar para determinar información sobre el entorno en el que se despliega la fibra óptica y el conductor.

Las señales de medición se utilizan para determinar información sobre la impedancia mecánica del entorno en el que se despliega la fibra óptica. Como el estímulo generado en la fibra óptica no se transmite a través del entorno local, sino que se genera por la interacción del campo magnético y de la corriente aplicada, la fuerza inducida hará que la fibra óptica intente moverse contra el entorno circundante. La resistencia del entorno a dicho movimiento, es decir, la impedancia del entorno, se determina por lo tanto observando las señales de medición detectadas por el interrogador 106.

La Figura 3 ilustra este principio. La Figura 3 muestra una sección de la fibra 104 óptica que está acoplada al conductor 202. La Figura 3 ilustra dos porciones 301 y 302 de detección separadas de la fibra óptica que cada una puede generar una señal de medición. La porción 301 de detección está en una parte de la fibra que está en un primer tipo de entorno. Por ejemplo, la porción 301 de detección puede estar ubicada en una sección de fibra que se despliega en el suelo pero que, por lo demás, no está restringida.

La porción 302 de detección está ubicada en una sección de fibra desplegada en un tipo diferente de entorno y, en esta ilustración, se implementa dentro o debajo de un medio 303.

Para determinar las condiciones del entorno locales, se aplica una corriente de CA al conductor 202, como se describió anteriormente. Para simplificar, considere nuevamente que hay una dirección de campo magnético en el plano del papel, de manera que la aplicación de la corriente de CA induce un movimiento de lado a lado del conductor 202 y, por lo tanto, de la fibra 104 óptica.

Para la porción 301 de detección, la fibra óptica está relativamente sin restricciones y, por lo tanto, puede ser relativamente libre para moverse en respuesta a la fuerza inducida. Por lo tanto, la fibra óptica en la porción 301 de detección puede experimentar un movimiento relativamente largo en respuesta al estímulo inducido por la corriente de CA. El movimiento de la fibra puede dar como resultado una variación de longitud de trayectoria relativamente grande dentro de la fibra y, por lo tanto, un cambio relativamente grande en las propiedades de la radiación retrodispersada de la fibra óptica. Por lo tanto, el interrogador de DAS puede detectar una señal de amplitud relativamente grande en esta porción de detección.

Sin embargo, la porción 302 de detección está integrada dentro o enterrada bajo el material 303. En esta ubicación, el movimiento de la fibra puede verse impedido por el material 303. Como la señal de medición resultante en efecto depende de cómo de grande es un movimiento experimentado por la fibra óptica, en este punto, la señal de medición resultante será, por lo tanto, indicativa de la impedancia mecánica del material 303. Por lo tanto, si el material 303 fuera, digamos arena ligera suelta que cubre la fibra 104 óptica, entonces la señal de medición de la porción 302 de detección puede tener un primer nivel de señal, mientras que si el material 303 fuese suelo denso compactado alrededor de la fibra 104, la señal de medición puede tener un nivel de señal diferente.

La medición de la impedancia del entorno local de la fibra óptica se puede utilizar para una variedad de aplicaciones, por ejemplo, detectar si un cable se ha enterrado puede ser útil para detectar cubrimientos de arena en vías de ferrocarril o cubrimientos de nieve. Para una fibra que puede estar parcialmente sumergida, se puede utilizar un cambio en la impedancia para indicar inundación o nivel de agua, o simplemente para indicar que un área está encharcada. La detección de impedancia también se puede utilizar para monitorización estructural. La fibra se puede

integrar dentro de una estructura y la detección de un cambio en la impedancia se podría utilizar para detectar la formación de huecos o similares.

El conductor 202 se puede acoplar mecánicamente a la fibra óptica en una variedad de maneras. Se puede utilizar cualquier tipo de acoplamiento mecánico que resulte en que la fuerza sobre el conductor se transmita a la fibra óptica.

Se apreciará que una fibra óptica se despliega típicamente en una estructura del cable de fibra óptica, que puede comprender uno o más materiales de cubierta para proporcionar protección a la fibra óptica. En algunos diseños de cable puede haber más de una fibra óptica. Por lo tanto, el conductor puede ser externo y estar conectado al cable de fibra óptica, por ejemplo, mediante una sujeción o unión adecuada. La Figura 4a muestra una sección transversal de una estructura 401 de cable de fibra óptica que tiene una fibra 402 óptica dispuesta dentro de al menos una capa 403 de cubierta. Unido al exterior del cable 401 de fibra óptica está un cable conductor, que comprende un núcleo 404 conductor en al menos una cubierta 405 aislante. El cable conductor se puede unir al cable de fibra óptica mediante el accesorio 406 que puede comprender adhesivo, amarres y/o abrazaderas, por ejemplo.

La Figura 4b muestra una sección transversal de otra realización de una estructura del cable, en donde el conductor está dispuesto dentro de la estructura del cable de fibra óptica. La fibra 402 óptica puede estar dispuesta con un material 403 de cubierta con un núcleo 404 conductor. El material 403 de cubierta, que puede comprender una o más capas, puede proporcionar protección y también puede proporcionar el acoplamiento mecánico del conductor y la fibra óptica.

La Figura 4c muestra una sección transversal de un cable de acuerdo con otra realización. Aquí, la fibra 402 óptica está rodeada por un manguito 406 de metal. Tales estructuras del cable existen y, generalmente, el manguito 406 de metal se proporciona para protección. Sin embargo, también se puede utilizar como un conductor arqueado que rodea la fibra óptica. El cable puede tener una capa 407 exterior y un material 408 intermedio que puede ser relativamente duro o rígido, de modo que el movimiento del conductor 406 resulte en movimiento del cable con respecto al entorno.

Con referencia a la Figura 2, el campo B magnético puede ser, en algunas aplicaciones, el campo magnético ambiental de la ubicación en la que se despliega la fibra óptica. El campo magnético ambiental puede ser el campo resultante del campo magnético de la Tierra. Por lo tanto, el método puede basarse en que el campo magnético de la Tierra interactúe con la corriente alterna suministrada al conductor.

Las pruebas han demostrado que el campo magnético de la Tierra es lo suficientemente fuerte como para generar una señal detectable en una fibra óptica acoplada a un cable que transporta una corriente alterna. En las pruebas iniciales, una corriente del orden de 3 A o más, era suficiente para generar una señal en presencia de solo el campo magnético de la Tierra en un entorno relativamente ruidoso. Sin embargo, en realizaciones bien ajustadas, el requisito de corriente puede ser menor, por ejemplo, serían suficientes corrientes de alrededor de 1 A o más y, en algunas aplicaciones, corrientes del orden de 10 mA o más pueden conducir a señales de medición detectables en presencia del campo magnético de la Tierra.

Donde se utiliza el campo magnético de la Tierra, se puede tener en cuenta la orientación general del campo magnético al desplegar la fibra óptica y el conductor.

El método también se puede utilizar para determinar las propiedades magnéticas del entorno local, como se ilustra en la Figura 5, que muestra una sección de fibra 104 óptica que está acoplada al conductor 202. La Figura 5 ilustra dos porciones 501 y 502 de detección separadas de fibra óptica, que cada una puede generar una señal de medición.

La porción 501 de detección se encuentra en una parte de la fibra que está ubicada en un entorno con una primera propiedad magnética. En la porción 501 de detección, la única contribución al campo magnético local puede ser el campo magnético de la Tierra. Por lo tanto, la intensidad del campo magnético en la porción 501 de detección puede ser un primer nivel B1. La aplicación de una corriente de CA definida al conductor 202, generaría una cierta fuerza en el conductor dependiendo de la intensidad del campo B1 magnético. Esto puede conducir a una primera señal de medición. Para mayor facilidad, el campo magnético se muestra como en el plano del papel, pero se entenderá que la dirección del campo dependerá de la ubicación y de la orientación de la fibra óptica y del conductor.

La porción 502 de detección está ubicada en un área con una característica magnética diferente. La porción 502 de detección recorre cerca del objeto 503 que, en uso, genera un campo magnético. El objeto podría ser un material magnético permanente o algún otro objeto que pudiera producir su propio campo magnético. Por ejemplo, el objeto puede ser una línea eléctrica que genera un campo magnético en funcionamiento, debido al flujo de corriente dentro de la línea eléctrica.

Alternativamente, el objeto 503 puede ser uno que genere un campo magnético secundario en respuesta al campo generado, en uso, por la corriente que fluye en el conductor 202.

5 En cualquier caso, el objeto 503, por lo tanto, contribuye a la intensidad B2 del campo de ambiente local y, por lo tanto, puede dar como resultado una intensidad de campo magnético en la porción 502 de detección que es significativamente diferente a la (B1) experimentada en la porción 501 de detección. Por lo tanto, para la misma corriente de CA aplicada, la fuerza inducida en la porción 502 de detección puede ser significativamente diferente a la inducida en la porción 503 de detección. Esto puede conducir a una señal de medición significativamente diferente, que puede utilizarse para determinar la ubicación de campos magnéticos/anomalías significativas en el ambiente.

10 Esto se puede utilizar para detectar objetos que producen/interactúan con campos magnéticos. También puede proporcionar un método de monitorización estructural de elementos metálicos. Una fibra óptica y un conductor podrían desplegarse en la proximidad un objeto metálico que se desea monitorizar, por ejemplo, una vía de ferrocarril o una viga de soporte en una estructura. La estructura puede influir en los campos magnéticos de cierta manera (por ejemplo, debido a dominios magnéticos formados dentro de la estructura). Si la integridad estructural del elemento cambia, por ejemplo, desarrolla una grieta significativa, esto podría afectar su interacción con el campo magnético y, por lo tanto, provocar un cambio en la intensidad del campo ambiental. El cambio resultante en la señal de medición se puede detectar y utilizar como una indicación de un problema. Además o en lugar de monitorizar las propiedades magnéticas de un elemento individual a lo largo del tiempo, el método también puede comparar los resultados de diferentes objetos de diferentes porciones de detección adyacentes para detectar cualquier anomalía significativa.

15 Señalar que la disposición descrita anteriormente es adecuada para detectar/monitorizar las intensidades de campos magnéticos relativas de campos magnéticos sustancialmente constantes. El método también podría utilizarse para detectar campos magnéticos variables. De hecho, si solo se deben detectar campos magnéticos variables, la corriente aplicada al conductor 202 podría ser una corriente continua. Un campo magnético variable, si está presente, conduciría entonces a una fuerza variable en el conductor y, por lo tanto, en la fibra óptica, mientras que cualquier componente estático o constante del campo magnético conduciría a un desplazamiento de CC en la señal de medición. Por lo tanto, por ejemplo, si el objeto 503 fuese un cable de alimentación que transportaba una corriente de CA y, por lo tanto, produjo un campo magnético variable, el cable de alimentación podría detectarse y/o monitorizarse aplicando una corriente de CC al conductor 202.

20 Refiriéndose nuevamente a la idea de detección de impedancia, la corriente requerida para generar una fuerza detectable puede reducirse incrementando deliberadamente el campo magnético que actúa sobre el conductor. Por lo tanto, en algunas realizaciones, uno o más elementos pueden desplegarse con la fibra óptica y el conductor para aumentar el campo magnético que actúa sobre el conductor, al menos en algunos puntos a lo largo de la longitud del conductor.

25 La Figura 6 muestra una realización donde un segundo elemento, que comprende uno o más elementos magnéticos, puede desplegarse en la proximidad de la fibra óptica y del conductor para aumentar el campo magnético (comparado con el campo ambiental que, de lo contrario, existiría en ausencia del segundo elemento).

30 La Figura 6 muestra que un imán 601 permanente puede estar dispuesto en el entorno en la proximidad de la fibra 104 óptica y del conductor 202. El imán permanente puede ubicarse relativamente cerca de la fibra óptica y del conductor, por ejemplo, adyacente a una estructura del cable de fibra óptica, pero puede estar separado. El imán 601 permanente puede estar dispuesto de modo que el campo magnético que genera pueda tener una orientación deseada con respecto a la fibra óptica y al conductor. Adicional o alternativamente, los imanes 602a y 602b permanentes podrían ubicarse a ambos lados de la fibra óptica y del conductor, y sus respectivos polos dispuestos para proporcionar una alineación de campo deseada. El imán permanente puede ser, en algunas realizaciones, un imán 603 permanente alargado que está dispuesto para recorrer a lo largo de la trayectoria de la fibra óptica y del conductor, para garantizar que una porción significativa de la fibra óptica acoplada al conductor experimenta un campo magnético por encima de la intensidad ambiental.

35 Utilizar imanes permanentes puede mejorar la señal de medición detectada para una magnitud de corriente CA dada y/o reducir los requisitos de corriente. Por ejemplo, en presencia de un campo magnético generado por un imán permanente, la corriente requerida para generar una señal detectable se redujo significativamente, en el orden de aproximadamente 0,2 A, en las pruebas mencionadas anteriormente.

40 Un imán 601 permanente puede, en algunas realizaciones, estar conectado a la fibra 104 óptica y/o al primer conductor 202 mediante un resorte 604 u otra conexión elástica similar. El resorte 604 permitirá el movimiento de la fibra 104 óptica y del conductor 202 con respecto al imán 601, pero asegurará que la fibra en dicho punto sea particularmente sensible a ciertas frecuencias, y puede proporcionar una frecuencia de resonancia que varía de acuerdo con el entorno.

Además o en lugar de utilizar imanes permanentes, se puede utilizar un segundo conductor para generar un campo magnético en el conductor acoplado a la fibra óptica. La Figura 7 muestra una realización en donde un segundo conductor 701 se despliega en la proximidad de la fibra óptica y del primer conductor. En uso, se suministra una primera corriente I_1 al primer conductor 202, acoplada a la fibra óptica, y se suministra una segunda corriente I_2 al segundo conductor 701. Ambas corrientes pueden generarse por el circuito 204 de accionamiento o pueden utilizarse circuitos separados. Como entenderá un experto en la técnica, cuando se desarrollen dos corrientes en conductores paralelos, se desarrollará una fuerza en cada uno de los conductores dependiendo de la dirección del flujo de corriente. Como se describió anteriormente y como se muestra en la Figura 7, la corriente en el primer conductor 202 puede ser una corriente de CA, mientras que la corriente en el segundo conductor 701 puede ser una corriente de CC. Esto conducirá a una fuerza F variable en el conductor 202 acoplado a la fibra óptica que varía entre la atracción y la repulsión de los dos conductores.

Por supuesto, se apreciará que se podría lograr un efecto similar generando una corriente de CC en el primer conductor 202 y una corriente de CA en el segundo conductor 701.

En algunas realizaciones, ambos conductores pueden suministrarse con CA.

En una realización alternativa, haciendo referencia de nuevo a la Figura 3, el conductor 202 puede comprender un material magnetoestrictivo, tal como acero o níquel, por ejemplo. Los materiales magnetoestrictivos exhiben un cambio en las dimensiones en presencia de un campo magnético. Cuando se utiliza como un conductor 202, el campo magnético generado, en uso, por la corriente que fluye en el conductor puede autoinducir la magnetoestricción. A medida que varía la corriente, el grado de magnetoestricción varía, lo que resulta en una fuerza variable sobre el conductor.

Las realizaciones descritas anteriormente han utilizado un conductor acoplado a la fibra óptica. En una realización alternativa, un elemento magnético se puede acoplar a la fibra óptica y se puede aplicar una corriente alterna para crear un campo magnético variable, creando así el estímulo en la fibra óptica.

La Figura 8 ilustra una fibra 104 óptica desplegada cerca de un conductor 801 alargado, que puede ser, por ejemplo, un cable conductor. La fibra óptica puede unirse a uno o más elementos 802a, 802b magnéticos, que están separados a lo largo de la longitud de la fibra óptica, y/o puede haber un elemento 803 magnético alargado acoplado a una longitud significativa de la fibra óptica. Los elementos 802a, 802b u 803 magnéticos pueden ser imanes permanentes o pueden estar formados de material paramagnético o diamagnético.

En uso, se aplica una corriente de CA al conductor 801 para generar un campo magnético variable a fin de inducir una fuerza variable en el o los elementos magnéticos y, por lo tanto, la fibra 104 óptica.

Ejemplo 1

Para demostrar los principios de la presente invención, se unió un cable de fibra óptica de 35 m de longitud a un conductor de cobre. Se conectó un generador de frecuencia y un amplificador al conductor para permitir que una señal eléctrica pasara a través del conductor. El cable de fibra óptica con conductor unido se orientó (magnéticamente) este-oeste en tierra, norte-sur en tierra y norte-sur en agua para pruebas utilizando el campo magnético de la Tierra. El ángulo local de inmersión para el campo magnético fue de aproximadamente 63° . Se introdujeron una variedad de frecuencias y amplitudes de corriente en el conductor y se registró la señal óptica. La señal de corriente utilizada fue tanto de onda continua como de barrido de frecuencia. Cuando el cable de fibra óptica estaba en la orientación norte-sur, los registros se hicieron con el cable de fibra óptica tendido en la superficie del suelo, ligeramente cubierto de arena seca y con grandes piezas de metal ferroso en las proximidades. Se realizaron pruebas adicionales utilizando imanes permanentes.

Los resultados mostraron que una señal clara era visible en todas las frecuencias de corriente utilizadas cuando la corriente estaba por encima de unos pocos amperios y el cable de fibra óptica estaba tendido sobre la superficie del suelo. La señal se redujo considerablemente cuando el cable de fibra óptica se cubrió con una capa delgada de arena o se sumergió en agua. Los armónicos eran visibles en la señal detectada y dependían de la dirección del campo magnético con respecto al cable de fibra óptica. Por lo tanto, el análisis de los armónicos puede proporcionar información sobre la orientación del campo magnético con respecto a la fibra óptica.

Las Figuras 9a y 9b muestran algunos resultados que indican la amplitud de la señal de medición detectada frente a la frecuencia de la corriente alterna suministrada. La Figura 9a muestra la amplitud de señal a una frecuencia correspondiente a la amplitud fundamental y la Figura 9b muestra la amplitud de la señal al doble de la frecuencia fundamental. Se puede ver que se puede detectar una señal de medición en una gama de frecuencias, hasta al menos 300 Hz, aunque la amplitud disminuye al aumentar la frecuencia de la corriente alterna. Puede esperarse que la señal de medición disminuya a medida que aumenta la frecuencia debido a la inercia del cable. Esto sugiere que puede ser útil una corriente de CA con una frecuencia inferior a unos 300 Hz. Los resultados en frecuencias más

bajas son más ruidosos y, por lo tanto, se puede preferir una frecuencia por encima de 1 Hz. En uso, la frecuencia puede modularse para adquirir lecturas en una serie de frecuencias diferentes.

Ejemplo 2

5 Para probar que esta señal de medición resulta realmente de la interacción del campo magnético local, es decir, el campo magnético de la Tierra en las pruebas descritas anteriormente, se realizaron una serie de pruebas adicionales en un entorno de laboratorio.

Prueba 1: la señal de medición en la fibra se midió con una corriente alterna que fluye a través del conductor de cobre conectado al cable de fibra óptica y se calculó la fuerza de Lorentz suponiendo que su origen se debe a la interacción de la corriente y del campo magnético de la Tierra.

10 Prueba 2: se utilizaron imanes permanentes para aumentar la intensidad del campo magnético local. Se descubrió que la amplitud de la señal para una señal eléctrica de CA dada, aumenta al aumentar la intensidad del campo magnético (resuelto perpendicular al eje de la fibra).

15 Prueba 3: la corriente variable en el tiempo en el conductor conectado al cable de fibra óptica se reemplazó con una corriente constante, y el campo magnético de CC se incrementó mediante un campo de CA generado por un gran par de bobinas de Helmholtz. Se calculó que la intensidad de la fuerza variable inducida por este enfoque es aproximadamente la misma que la fuerza variable en la prueba 1. También se descubrió que la amplitud de la señal es aproximadamente la misma que en la prueba 1.

20 Prueba 4: el cable de cobre fue reemplazado por un cable de níquel con propiedades magnetoestrictivas conocidas. En este caso, se descubrió que la magnitud de la señal (mucho más larga) correspondía con la amplitud esperada por la magnetoestricción del cable de níquel.

Ejemplo 3

25 También se observó un claro cambio en la señal, cuando se colocaron grandes piezas de metal ferroso cerca de la fibra, lo que indica la idoneidad para la detección de objetos ferrosos. Utilizando la misma configuración de prueba que en el **Ejemplo 1**, los resultados se obtuvieron durante un período de 2 minutos mientras una corriente alterna de RMS de 7 amp fluía en el conductor. Durante el primer minuto se mantuvo una viga de acero dulce de 6 m de longitud de sección en l a una distancia de 10 m de la fibra. A mitad del período, la viga se elevó ligeramente hasta aproximadamente 50 mm del cable de fibra óptica. La Figura 10 muestra un espectrograma para una única porción de detección de fibra óptica en la ubicación donde se introdujo la viga de acero. La Figura 10 muestra la variación en la distribución de potencia de la señal de medición en frecuencia frente al tiempo. La intensidad normalmente estaría representada por colores.

30 En la Figura 10 puede verse que hay un componente 1001 claro de la señal de medición detectada a aproximadamente 53 Hz y también otro 1002 a aproximadamente 106 Hz. Estas señales (que no son tan claras en la versión en blanco y negro de la Figura 10 como la gráfica original) corresponden a la frecuencia fundamental y al primer armónico, y son fácilmente detectables en la señal de medición. También se pueden ver otros armónicos de orden superior.

35 A los 60, cuando la viga de acero se acerca, la naturaleza de las señales cambia, especialmente el componente alrededor de 53 Hz.

40 Las señales de medición de una serie de diferentes porciones de detección de la fibra óptica se analizaron adicionalmente en dos bandas de frecuencia específicas, como se muestra en las Figuras 11a y 11b. Las Figuras 11a y 11b muestran la potencia en la banda de frecuencia de 52 a 54 Hz y de 104 a 108 Hz, respectivamente, representando el tiempo frente el canal óptico (es decir, la porción de detección) y representando la potencia por intensidad. Los canales ópticos 0 a 56 corresponden a una fibra óptica y los canales ópticos 56 a 90 a una trayectoria de retorno proporcionada por otra fibra óptica en el mismo cable de fibra óptica. El conductor de cobre se unió al cable de fibra óptica, correspondiente a los canales 53-56 en la trayectoria saliente y 56-59 en la trayectoria de retorno. La viga de acero estaba ubicada en el centro del conductor de cobre y, por lo tanto, en una ubicación correspondiente a los canales ópticos 54 y 58.

45 Se puede ver claramente que la potencia correspondiente a la frecuencia fundamental cambia cuando el metal se acerca al cable, pero la amplitud del primer armónico es bastante constante. Este experimento se repitió en una gama de frecuencias con resultados similares.

50 Esto indica que la presencia de material ferromagnético puede detectarse a partir de la señal de medición adquirida cuando se aplica una corriente variable.

5 Estas pruebas y ejemplos muestran la aplicación de la presente invención para la detección de las características del entorno, tales como la impedancia o las propiedades magnéticas. Esta detección del entorno se puede realizar como el objetivo principal del sensor, pero en algunas realizaciones, el aparato puede utilizarse para alguna otra detección de fibra óptica. Por ejemplo, haciendo referencia a la Figura 2, el interrogador 201 puede estar dispuesto para interrogar la fibra 104 óptica para proporcionar un sensor acústico distribuido. El interrogador puede funcionar, principalmente, como un sensor de DAS sin una corriente que fluya en el conductor para detectar señales acústicas del entorno. Periódicamente, sin embargo, el sensor puede estar dispuesto para aplicar la corriente de CA alterna al conductor 202 a fin de determinar las características del entorno.

10 Mientras que el interrogador 201 puede proporcionar detección de DAS cuando la corriente de CA no se aplica, en otras realizaciones, el interrogador puede proporcionar otra funcionalidad de detección, por ejemplo, DTS. En algunas aplicaciones, las señales de medición adquiridas cuando se aplica la corriente de CA, se pueden utilizar para calibrar las señales de las porciones de detección en ausencia de la corriente de CA.

15 En una realización, en lugar de detectar una propiedad inherente del entorno, se puede utilizar una impedancia variable para proporcionar una capacidad de detección adicional. El cable de fibra óptica se puede acoplar a, o integrarse dentro de, un material cuyas propiedades de impedancia, viscosidad, deformabilidad, rigidez, etc., varían con un parámetro deseado que se desea detectar. Por lo tanto, el método puede comprender determinar la impedancia del material y, por lo tanto, el parámetro detectado.

20 Por ejemplo, haciendo referencia de nuevo a la Figura 4c, el material 408 intermedio podría ser un gel cuya viscosidad varía con la temperatura o la exposición a UV (a través de una cubierta 407 transparente), o podría comprender un material aplastable que se deforme con la presión. En cualquiera de estos casos, la impedancia al movimiento de la fibra óptica dentro del cable está determinada por el parámetro que se desea detectar (siempre que el cable exterior esté relativamente fijo en el entorno).

REIVINDICACIONES

1. Un método de detección de fibra óptica que comprende:
 - interrogar una fibra (104) óptica desplegada en un área de interés con radiación óptica, en donde al menos parte (203) de la fibra óptica está acoplada mecánicamente a al menos un primer elemento (202; 803) sensible, en uso, a campos electromagnéticos;
 - aplicar una corriente (I) variable eléctrica para inducir una fuerza (F) variable sobre dicho primer elemento; y caracterizado por:
 - analizar la radiación óptica retrodispersada desde dentro de dicha fibra óptica para determinar una señal de medición indicativa de una variación en la radiación retrodispersada correspondiente a dicha corriente eléctrica aplicada; y
 - analizar dicha señal de medición para determinar una impedancia mecánica del entorno en el que se despliega la fibra óptica.
2. Un método según se reivindica en la reivindicación 1, en donde el primer elemento es un primer conductor (202; 402; 406) y el método comprende generar, en uso, una corriente (I) en el primer conductor en presencia de un campo (B) magnético, en donde la corriente variable se aplica para crear un flujo de corriente variable en el primer conductor y/o un campo magnético variable.
3. Un método según se reivindica en la reivindicación 2, que comprende disponer la fibra óptica y el primer conductor en un campo (B) magnético en uso, en donde la corriente (I) variable se aplica al primer conductor para inducir la fuerza (F) variable en el primer conductor.
4. Un método según se reivindica en la reivindicación 3, que comprende disponer al menos un segundo elemento (601; 603; 701) que, en uso, genera un campo magnético, en la proximidad del primer elemento.
5. Un método según se reivindica en la reivindicación 4, en donde el segundo elemento comprende un material (601; 603) magnético permanente.
6. Un método según se reivindica en la reivindicación 4, en donde el segundo elemento comprende un segundo conductor (701) y el método comprende aplicar una corriente (I₂) a dicho segundo conductor para generar un campo magnético.
7. Un método según se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 2-6, en donde el primer conductor es un conductor alargado.
8. Un método según se reivindica en la reivindicación 7, en donde el primer conductor (406) tiene una sección transversal arqueada y rodea, al menos parcialmente, la fibra óptica.
9. Un método según se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 7 a 8, en donde el primer conductor está formado con la fibra óptica en una estructura del cable.
10. Un método según se reivindica en la reivindicación 1, en donde el primer elemento comprende al menos un elemento (802; 803) magnético sensible a un campo magnético aplicado, y el método comprende aplicar la corriente (I) variable para variar el campo magnético que actúa sobre el primer elemento.
11. Un método según se reivindica en la reivindicación 10, en donde el al menos un elemento (803) magnético está incorporado en una estructura del cable de fibra óptica con la fibra óptica.
12. Un método según se reivindica en cualquiera de las reivindicaciones 10 a 11, en donde la corriente variable se aplica a un segundo elemento (801) para generar un campo magnético variable, en donde el segundo elemento comprende un conductor desplegado en la proximidad del elemento magnético y de la fibra óptica.
13. Un método según se reivindica en cualquier reivindicación precedente, en donde determinar la impedancia mecánica del entorno comprende comparar diferentes señales de medición de diferentes partes de la fibra óptica, y/o señales de medición de una sección dada de la fibra óptica adquirida en diferentes momentos, para dar una medida relativa de la impedancia mecánica del entorno y/o analizar la señal de medición de al menos una sección de fibra para estimar una impedancia mecánica de entorno actual.
14. Un método según se reivindica en cualquier reivindicación precedente, que comprende además interrogar la fibra óptica sin que se aplique la corriente variable para proporcionar al menos una primera función de detección.
15. Un método según se reivindica en la reivindicación 14, en donde la determinación de la característica del entorno se utiliza para calibrar las mediciones de la primera función de detección.

16. Un método según se reivindica en cualquier reivindicación precedente, en donde la fibra óptica y el primer elemento están acoplados a un material cuyas propiedades varían de acuerdo con un primer parámetro para modificar la impedancia mecánica del entorno de la fibra óptica.

17. Un aparato sensor de fibra óptica que comprende:

- 5 una fibra (104) óptica, al menos parte (203) de la cual está acoplada mecánicamente a al menos un primer elemento (202; 803) sensible, en uso, a campos electromagnéticos;
- una unidad (201) interrogadora para interrogar dicha fibra óptica con radiación óptica; y
- un circuito (204) eléctrico para generar una corriente (I) eléctrica variable para inducir una fuerza (F) variable en dicho primer elemento; caracterizado por
- 10 un procesador configurado para analizar la radiación óptica retrodispersada desde dentro de dicha fibra óptica para determinar una señal de medición indicativa de una variación en la radiación retrodispersada, correspondiente a dicha corriente eléctrica aplicada, y analizar dicha señal de medición para determinar una impedancia mecánica del entorno en el que está desplegada la fibra óptica.

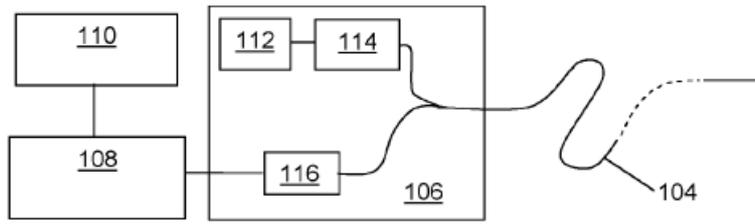


Figura 1

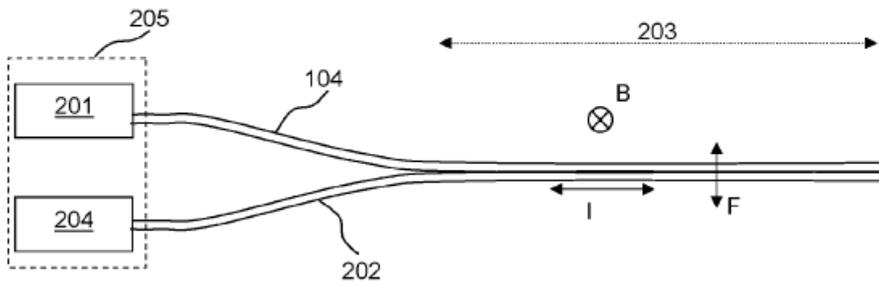


Figura 2

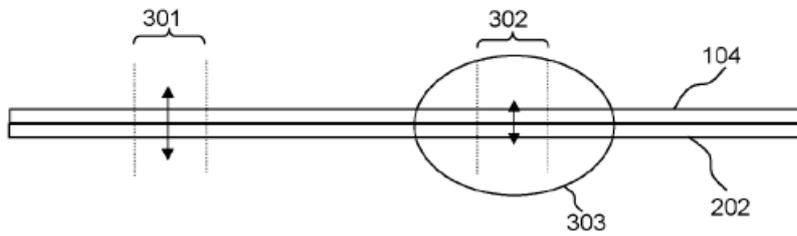


Figura 3

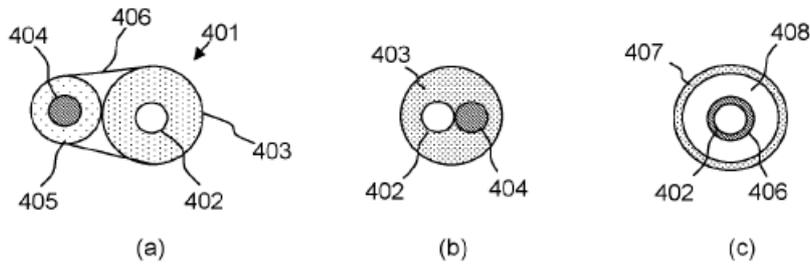


Figura 4

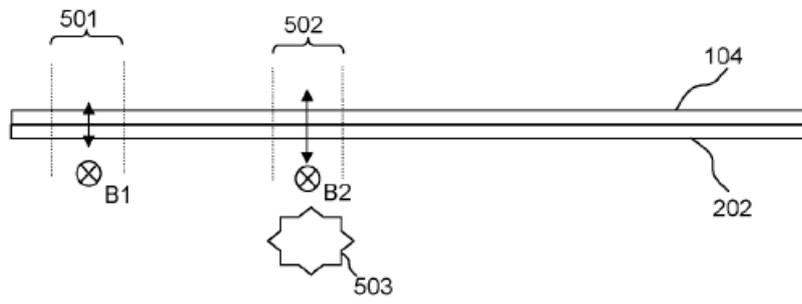


Figura 5

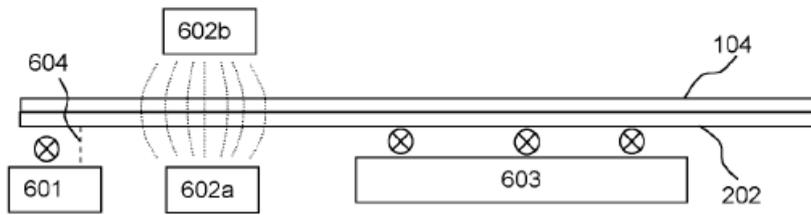


Figura 6

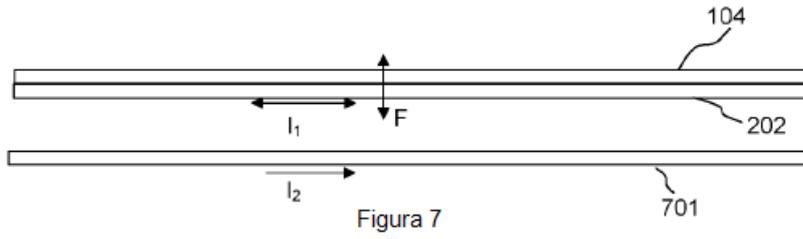


Figura 7

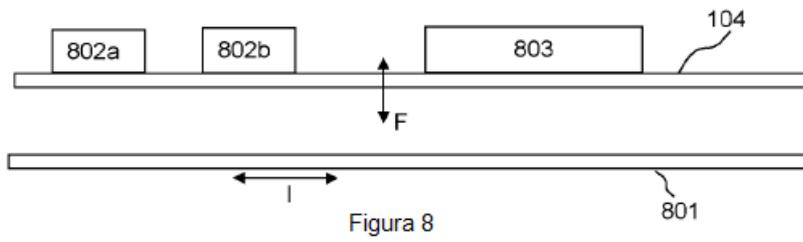


Figura 8

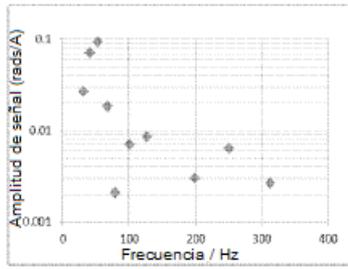


Figura 9a

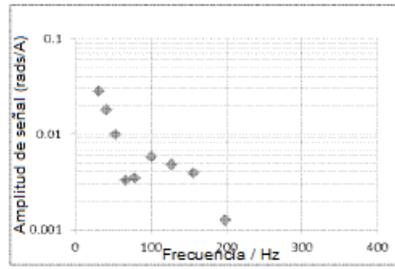


Figura 9b

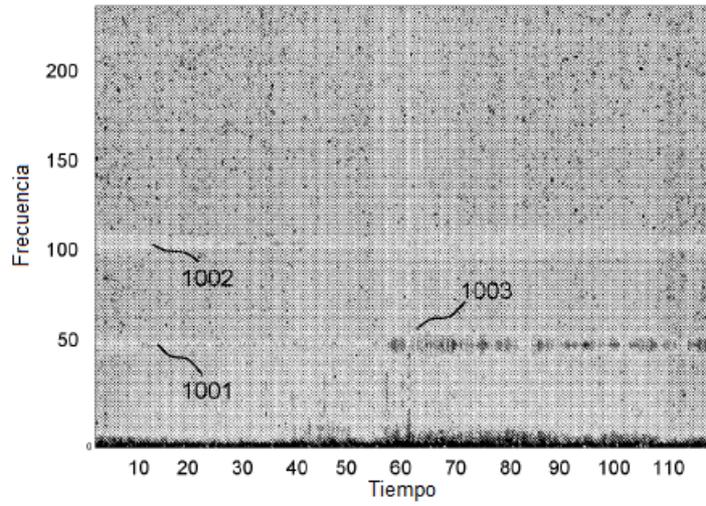


Figura 10

Gráfico de histograma

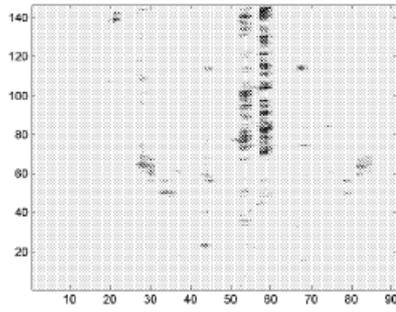


Fig. 11a

Gráfico de histograma

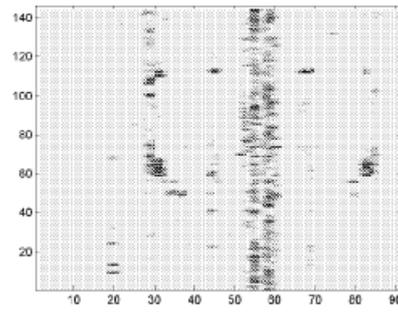


Fig. 11b