

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 632 612**

51 Int. Cl.:

**G01N 21/77** (2006.01)

**G01N 33/00** (2006.01)

**G01N 33/28** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.08.2014 E 14181427 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.04.2017 EP 2988116**

54 Título: **Sensor óptico para detectar hidrógeno en fluido y uso de una película de aleación fina en el sensor de hidrógeno**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.09.2017**

73 Titular/es:

**ABB SCHWEIZ AG (100.0%)  
Brown Boveri Strasse 6  
5400 Baden, CH**

72 Inventor/es:

**VAN MECHELEN, JACOBUS LODEVICUS  
MARTINUS;  
PANELLA, BARBARA;  
GARCIA, MERCEDES VICTORIA;  
WESTERWAAL, RUUD JOHANNES y  
DAM, BERNHARD**

74 Agente/Representante:

**CONTRERAS PÉREZ, Yahel**

ES 2 632 612 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

Sensor óptico para detectar hidrógeno en fluido y uso de una película de aleación fina en el sensor de hidrógeno.

5 Aspectos de la presente descripción se refieren a un sensor de hidrógeno, un sistema de detección de hidrógeno que utiliza el mismo, y a un dispositivo eléctrico que incluye dicho sistema de detección. En particular, los aspectos se refieren a un sensor de hidrógeno y un sistema de detección de hidrógeno con dicho sensor para equipos eléctricos llenos de líquido y, más concretamente, a transformadores eléctricos llenos de aceite que tienen dichos sistemas de detección de hidrógeno y sensores de hidrógeno.

10 Técnica anterior

Los equipos eléctricos con aislamiento líquido, tales como los reactores de derivación, bujes y, especialmente, transformadores llenos de aceite, tales como transformadores de potencia y de distribución, se llenan con un líquido aislante, en particular aceite, para fines de refrigeración y aislamiento eléctrico. Los fallos en el interior del equipo eléctrico, así como la degradación del líquido aislante y de otros componentes aislantes tales como papel aislante que se encuentra dispuesto en el interior del equipo eléctrico pueden formar gases de descomposición que se disuelven principalmente en el líquido. Esto es válido para equipos que emplean tanto aceite mineral como aceite de fuentes naturales.

20 Es importante detectar pronto estos fallos, errores y degradaciones, ya que especialmente los transformadores son componentes importantes de la red eléctrica, y un fallo de los mismos puede resultar muy costoso. Por lo tanto, se supone que un transformador funciona de manera continua y libre de errores tanto como sea posible durante muchos años o incluso décadas.

25 La cantidad y composición de los gases de descomposición depende del defecto subyacente: Un fallo grande con un elevado contenido en energía, tal como un sobrecalentamiento o un arco eléctrico rápido, provoca que se produzcan grandes cantidades de gas en un corto período de tiempo, mientras que la cantidad de gas producido por un pequeño fallo puede ser relativamente menor. También, las concentraciones relativas de los diferentes gases disueltos podrían indicar el tipo específico de fallo. De este modo, si se conoce la naturaleza y la cantidad de gases individuales disueltos en el líquido aislante, el hecho de que se produzca una variación en la concentración de un gas específico en el aceite puede utilizarse para identificar un fallo eléctrico en el equipo. Se sabe que uno de los indicadores más importantes para un fallo eléctrico en transformadores aislados de aceite es la aparición de gas hidrógeno disuelto en el aceite, que se produce, por ejemplo, en una parte defectuosa de un aislamiento de un devanado del transformador por descomposición térmica o eléctrica del aceite. Por esta razón, es deseable poder detectar tales errores, que eventualmente pueden provocar un fallo completo del transformador, tan pronto como sea posible identificando un aumento de la concentración de hidrógeno. Esto idealmente debería ser posible en una etapa en la que todavía puedan tomarse contramedidas apropiadas antes de que se produzca un mal funcionamiento grave y potencialmente costoso.

40 En una fase muy temprana del fallo eléctrico, sólo puede producirse una cantidad muy pequeña de gas hidrógeno, que se disuelve en el aceite y, por lo tanto, una concentración de hidrógeno disuelto se acumula en el aceite durante un mayor período de tiempo, de modo que la concentración de hidrógeno en el aceite puede, por lo menos durante una fase temprana del fallo, incluso estar por debajo de un umbral en el que puede detectarse con la mayoría de los métodos de detección conocidos.

50 La mayoría de los transformadores eléctricos modernos en las redes eléctricas todavía no están equipados con dispositivos de monitorización en línea o en tiempo real para tales gases. Con el fin de controlar y evaluar la salud de estos transformadores, periódicamente se toma una muestra de aceite del baño de aceite aislante y se envía a laboratorios cualificados donde se miden los gases disueltos y otras propiedades del aceite. Este método de monitorización lleva mucho tiempo, carece de continuidad, tiene el riesgo de error humano y es muy costoso. Incluso si este costoso método se lleva a cabo con más frecuencia, existen varias posibles fuentes de error en el proceso, por ejemplo, cambios en las propiedades químicas y físicas de la sonda durante el transporte entre el punto en el momento en que se extrae la sonda y el momento en que el contenido de gas se determina realmente en un laboratorio. Además, este método no proporciona ninguna información acerca de dónde se produjo un fallo en el transformador. Por lo tanto, este método aquí no tendrá más interés, a pesar de que todavía se utiliza ampliamente.

60 Por otra parte, en los métodos en línea, la concentración de gas en el líquido aislante se controla directamente y (casi) continuamente. Para ello, existen sistemas de control, a veces incorporados, para medir el hidrógeno en el aceite del transformador. Estos sistemas se basan en diferentes técnicas de detección. Incluyen, por ejemplo, sensores semiconductores, analizadores de conductividad térmica, pellistores y sensores de celdas de combustible, entre otros. Estas técnicas de detección normalmente requieren un complicado sistema de separación de gases que añade complejidad y coste al diseño y la calibración del sensor. Por lo tanto, estos dispositivos generalmente son

engorrosos y costosos. Además, algunas de estas técnicas de monitorización padecen una sensibilidad cruzada hacia otros gases presentes en el aceite, lo que provoca, además, que los resultados sean menos fiables.

Por lo tanto, incluso los transformadores avanzados, es decir, aquellos equipados con un sistema de monitorización de gas en línea dedicado, a menudo se verifican adicionalmente y periódicamente con costosas pruebas de laboratorio para garantizar la precisión del sistema de monitorización de gas en línea. Por lo tanto, un sistema de detección de hidrógeno cuantitativo, fiable, económico y continuo que emplee un sensor sería ideal para monitorizar la concentración de hidrógeno en el aceite aislante con el fin de poder detectar fallos en una etapa tan pronto como sea posible. Esto implica que puede monitorizarse en línea un estado de salud del transformador o incluso desde una ubicación remota.

Ha habido propuestas para tales dispositivos de monitorización de hidrógeno en línea que incluyen sensores de fibra óptica a base de una película fina, en los que un material de detección varía sus propiedades ópticas tras una exposición al hidrógeno disuelto en el aceite. Uno de estos sistemas para detectar gas hidrógeno se describe como un dispositivo de conmutación óptico en WO 2007 049965 A1.

En "*Optical fiber sensor for the continuous monitoring of hydrogen in oil*" de T. Mak, R. J. Westerwaal, M. Slaman, H. Schreuders, W. van Vugt, M. Victoria, C. Boelsma, B. Dam, en: *Sensors and Actuators B* 190 (2014) 982-989 se da otra propuesta. De este modo, los sensores ópticos propuestos incluyen una película sensible que comprende, por ejemplo, una aleación de Mg y Ti, cubierta con una capa que contiene Pd.

Otro sensor óptico se describe en "*Fiber optic hydrogen detectors containing Mg-based metal hydrides*" de Slaman y otros, en: *Sensors and Actuators B*, vol. 123 nº 1, 30 de marzo de 2007, páginas 538-545, el cual comprende una fibra óptica, en la que una parte extrema de la fibra óptica está recubierta con una capa de detección que comprende una película de una aleación, comprendiendo la aleación Mg y Ni y una capa de catalizador que comprende Pd.

Sin embargo, tales configuraciones conocidas dejan mucho margen para mejorar. En primer lugar, la sensibilidad de algunos de estos sensores tiene, incluso puede pretenderse, una característica de tipo conmutador en los regímenes de temperatura de interés. Es decir, estos sensores ópticos varían fundamentalmente sus propiedades ópticas, es decir su reflectancia, cuando se alcanza un valor umbral de la concentración de hidrógeno supervisada en el aceite. Esto significa que un sistema de detección de hidrógeno con dicho sensor puede indicar y únicamente indicará si se ha alcanzado o no una determinada concentración umbral de hidrógeno. Por lo tanto, típicamente no puede detectarse o indicarse que se produce un aumento lento de la concentración de hidrógeno durante un período de tiempo más largo, tal como horas, días o incluso meses, lo cual, sin embargo, podría considerarse como una indicación de un fallo de desarrollo lento. Por lo tanto, no se indica una concentración real de hidrógeno en el aceite del transformador, sino solamente que se ha alcanzado o superado un valor umbral para la concentración de gas.

Otros sensores ópticos muestran un cambio continuo de sus propiedades ópticas con concentraciones crecientes de hidrógeno en el aceite, sin embargo, carecen de sensibilidad en determinados regímenes de concentración de temperatura e hidrógeno lo cual sería deseable para permitir el control de la concentración de hidrógeno en una amplia gama de posibles condiciones de funcionamiento de transformadores. Por ejemplo, el sensor de hidrógeno utilizado por Mak y otros (2014) puede medir concentraciones de hidrógeno continuamente entre 5 ppm y 1.500 ppm, sin embargo, sólo por encima de una temperatura de funcionamiento de 80 °C del sensor. Ésta, sin embargo, es más elevada que la temperatura estándar del aceite en la mayoría de los tipos de transformadores. A temperaturas de funcionamiento más bajas, que son mucho más significativas para el funcionamiento estándar del transformador, los intervalos de medición efectivos para las concentraciones de hidrógeno son mucho más pequeños (y la sensibilidad inferior) con la tecnología conocida, de modo que es mejorable para la detección de fallos del transformador. Además, a menudo estos sistemas de hidruro metálico no muestran un comportamiento óptico reproducible en ciclos de hidrógeno, tal como se requiere, lo que da como resultado una respuesta inestable del sensor a lo largo del tiempo.

A la vista de los anteriores factores y otros, existe la necesidad de la presente invención.

#### Descripción de la invención

A la vista de lo anterior, se dispone un sensor óptico de acuerdo con la reivindicación 1, un sistema de detección de acuerdo con la reivindicación 9, un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 13, y un uso de acuerdo con la reivindicación 15.

De acuerdo con un aspecto, se dispone un sensor óptico para detectar hidrógeno en un fluido en contacto físico con el sensor. El sensor óptico comprende una fibra óptica, en la que una parte extrema de la fibra óptica está recubierta con una multicapa que comprende: una capa de detección, que comprende una película de una aleación, comprendiendo la aleación Mg, Ni y M, donde M es por lo menos uno de Zr, Ta y Hf, y donde la aleación tiene la

composición  $Mg_xNi_yM_z$ , y en la que x es entre 40 y 60, y es entre 10 y 40 y z es entre 10 y 40, y una capa de catalizador que comprende Pd.

5 De acuerdo con otro aspecto, se dispone un sistema de detección de hidrógeno en fluidos, que comprende una fibra óptica, en la que una parte extrema de la fibra óptica está revestida con una multicapa que comprende: una capa de detección, que comprende una película de una aleación, comprendiendo la aleación Mg, Ni y M, donde M es por lo menos uno de Zr, Ta y Hf, y en el que la aleación tiene la composición  $Mg_xNi_yM_z$ , y en la que x es entre 40 a 60, y es entre 10 y 40 y z es entre 10 y 40 y una capa de catalizador que comprende Pd, un sensor de temperatura, una fuente de luz, un dispositivo de detección de luz y una unidad de control, en el que la luz procedente de la fuente de luz es guiada hacia el sensor óptico, la luz reflejada por la multicapa del sensor óptico es detectada por el dispositivo de detección de luz y en la que la unidad de control procesa una señal de salida del dispositivo de detección de luz, y suministra una señal respectiva.

15 De acuerdo con otro aspecto, se dispone un dispositivo para la generación, transmisión o distribución de energía eléctrica. Comprende un volumen de aceite y un sistema de detección de hidrógeno en fluidos, que comprende un sensor óptico que comprende una fibra óptica, en el que una parte extrema de la fibra óptica está revestida con una multicapa que comprende: una capa de detección, que comprende una película de una aleación, comprendiendo la aleación Mg, Ni y M, donde M es por lo menos uno de Zr, Ta y Hf, y en la que la aleación tiene la composición  $Mg_xNi_yM_z$ , y en la que x es entre 40 y 60, y es entre 10 y 40 y z es entre 10 y 40, una capa de catalizador que comprende Pd, un sensor de temperatura, una fuente de luz, un dispositivo de detección de luz y una unidad de control, en el que la luz procedente de la fuente de luz es guiada hacia el sensor óptico, la luz reflejada por la multicapa del sensor óptico es detectada por el dispositivo de detección de luz, y en el que la unidad de control procesa una señal de salida del dispositivo de detección de luz, determina una concentración de hidrógeno, y envía una señal respectiva.

25 De acuerdo con todavía otro aspecto, se presenta el uso de una película fina de una aleación en un sensor de hidrógeno. La aleación comprende Mg, Ni y M, donde M es por lo menos uno de Zr, Ta y Hf, y en la aleación tiene la composición  $Mg_xNi_yM_z$ , en la que x es entre 40 y 60, y es entre 10 y 40 y z es entre 10 y 40.

30 Otras ventajas, características, aspectos y detalles que pueden combinarse con realizaciones descritas aquí son evidentes a partir de las reivindicaciones dependientes, la descripción y los dibujos.

35 El presente sensor óptico y el sistema de detección que lo utiliza, así como los procedimientos descritos para el funcionamiento y los usos de los mismos en dispositivos eléctricos, todos de acuerdo con realizaciones de la invención, permiten obtener una buena estimación de un estado del equipo eléctrico y/o de su líquido aislante utilizando una configuración de equipo que funciona de manera fiable y que sólo necesita una calibración mínima. Debido a la detección óptica, pueden evitarse interferencias eléctricas, y el sistema es intrínsecamente seguro, debido a la ausencia de contactos eléctricos y conductores en la zona de detección. Además, el sistema utiliza componentes ópticos estándar económicos, es, por lo tanto, simple, rentable y robusto, y no tiene elementos móviles. Puede ampliarse con muchos sensores de fibra utilizados simultáneamente en posiciones iguales o diferentes, los cuales pueden utilizarse para localizar dónde se produce un fallo, o para añadir redundancia de manera rentable y/o evitar falsas lecturas. El conjunto de sensor es especialmente ventajoso para el control de transformadores llenos de aceite. En realizaciones, se presenta un sistema híbrido metal-aleación como capa de detección que presenta una gran variación óptica y una isoterma de transmisión de presión inclinada en el intervalo de temperatura y presión de interés. Además, el sensor y el sistema de detección que se presentan son estables respecto al ciclo y en el tiempo, en particular en el intervalo de temperatura de interés particular, que es de por lo menos aproximadamente entre 5°C y por lo menos aproximadamente 100°C.

50 Breve descripción de las figuras

A continuación, se describirán más detalles con referencia a las figuras, en las cuales

- La figura 1 es una vista esquemática de una multicapa de un sensor óptico de acuerdo con realizaciones;
- La figura 2 es una vista esquemática de una característica de sensor de acuerdo con realizaciones;
- 55 La figura 3 es otra vista esquemática de una característica de sensor de acuerdo con realizaciones;
- La figura 4 es una vista esquemática de un sensor característico de un sensor conocido;
- La figura 5 es un diagrama de una gráfica del funcionamiento de un sensor óptico de acuerdo con realizaciones;
- La figura 6 es una vista esquemática de un sensor óptico de acuerdo con realizaciones;
- La figura 7 es una vista esquemática de un sistema de detección de acuerdo con realizaciones;
- 60 La figura 8 es una vista esquemática de un dispositivo eléctrico de acuerdo con realizaciones.

Descripción detallada de aspectos de la invención

5 Tal como se utiliza aquí, las aleaciones metálicas definidas por una fórmula con porcentajes atómicos que típicamente suman un 100 por cien, tal como, por ejemplo,  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$ , pretenden incluir también sustancias con una composición que se desvíe de aquella con los números exactos proporcionados. Típicamente, las aleaciones que tienen una composición en la que cada número, independientemente uno de otro, tienen una tolerancia de +/- 15 por ciento, se consideran todavía que se encuentran dentro de la aleación metálica proporcionada por la fórmula exacta, tal como el ejemplo anterior, también si los números individuales no suman 100 en total. También, tal como se utilizar aquí, dichas aleaciones pueden comprender sustancias adicionales no nombradas tales como elementos químicos de cantidades menores, tales como de hasta aproximadamente un 2 por ciento, cada uno, pero no más de aproximadamente un 10 por ciento en total.

10 Tal como se utiliza aquí, el término "fluido" pretende ser representativo tanto de gases como de líquidos. No obstante, se utiliza principalmente para representar un líquido aislante, en particular un aceite, que forma parte del sistema de aislamiento y/o refrigeración de un dispositivo eléctrico, más particularmente de un transformador de potencia.

15 A continuación, se describen en detalle algunos aspectos de la invención. Los aspectos y partes de los aspectos son independientes entre sí y pueden combinarse de cualquier manera. Por ejemplo, cualquier aspecto o realización descrito en este documento puede combinarse con cualquier otro aspecto o realización, siempre que las combinaciones que se obtengan sean técnicamente viables.

20 En primer lugar, se describen algunos aspectos generales posibles relacionados con el conjunto sensor. El conjunto sensor está adaptado para detectar una condición de estado de un equipo eléctrico con aislante líquido. Aquí, el equipo eléctrico se refiere a cualquier equipo tal como reactores de derivación, bujes y transformadores. La invención es particularmente adecuada si el líquido aislante es aceite aislante, ya sea de base mineral o de fuentes orgánicas, tal como aceite de palma. La invención es particularmente adecuada especialmente si el equipo eléctrico es un transformador, tal como un transformador de potencia o de distribución, y más particularmente si se trata de un transformador lleno de aceite.

30 La condición de estado del equipo eléctrico se expresa aquí por el contenido de hidrógeno (o concentración de hidrógeno) del líquido aislante, que es un indicador fiable de diversas condiciones, en particular condiciones de fallo. El contenido de hidrógeno se define como la cantidad de hidrógeno disuelto en el líquido aislante (en ppm). Una capa sensible al hidrógeno (en lo sucesivo también denominada capa de detección) de un sensor óptico está dispuesta en comunicación con el fluido (líquido aislante, aceite), y se sumerge preferiblemente en el líquido aislante, de manera que la cantidad de hidrógeno disuelto en el líquido aislante resulta en una presión parcial de hidrógeno característica en el sensor óptico, siendo esta presión parcial en función del contenido de hidrógeno (en ppm) en el líquido aislante. Esta relación puede depender de parámetros adicionales tales como la temperatura del líquido aislante y/o de la capa sensible al hidrógeno, y del tipo de aceite utilizado en el transformador. Aquí, el término "hidrógeno" puede referirse a moléculas o átomos de hidrógeno (que pueden ser radicales). Tal como se utiliza aquí, la capa de detección "que está en comunicación con un fluido" significa que los componentes gaseosos de interés presentes en el fluido, en particular hidrógeno, pueden llegar a la capa de detección, incluso si entre la capa de detección y el fluido se encuentran situadas otras capas para catálisis, protección o similares. La aleación metálica de la capa de detección reacciona con este hidrógeno del fluido, que se difunde a través de una capa de protección, y forma un sistema de hidruro de aleación metálica. Esta última reacción es un motivo para la variación de las propiedades ópticas de la capa de detección cuando hay presente hidrógeno, lo cual se utiliza para una detección de hidrógeno en realizaciones.

45 A continuación, se describen con más detalle algunos aspectos relacionados con la fuente de luz. Aquí, la luz se define como radiación electromagnética. La radiación puede tener cualquier longitud de onda, pero preferiblemente se encuentra en uno de los intervalos de longitud de onda de infrarrojos medios, infrarrojos cercanos y visible.

50 A continuación, se describen con más detalle algunos aspectos relativos al sensor óptico para detectar hidrógeno. El sensor óptico para detectar hidrógeno está conectado ópticamente a una fuente de luz para recibir luz desde la fuente de luz. El sensor óptico tiene una capa de detección que varía su respuesta óptica respecto a la luz recibida, en particular su reflectancia, dependiendo de la cantidad de hidrógeno presente en la capa de detección. Esto significa que una presión parcial de hidrógeno variable también da lugar a un cambio en la reflectancia de la capa de detección. Como la capa de detección forma parte del sensor óptico, el sensor óptico también varía su reflectancia.

60 Tal como se ha indicado anteriormente, la cantidad de hidrógeno puede definirse en términos de una presión parcial de hidrógeno en el sensor óptico, que está directamente relacionada con una cantidad de hidrógeno (en ppm) disuelto en el líquido aislante. De este modo, la reflectancia del sensor óptico expresa la cantidad de hidrógeno y, por lo tanto, puede tomarse como un indicador de estado del equipo eléctrico, ya que una concentración creciente de hidrógeno es un primer indicio de un potencial fallo del equipo eléctrico, tal como se ha descrito anteriormente. Por lo tanto, por experiencia, se definen unos umbrales para la concentración de hidrógeno, que se consideran aquí

como indicativos de posibles fallos cuando se superan. Un primer umbral se define a 150 ppm, y un segundo umbral se define a 250 ppm. Sin embargo, estos umbrales deben considerarse solamente como ejemplos no limitativos y pueden definirse de manera distinta bajo diferentes condiciones de funcionamiento y configuraciones sin apartarse del alcance de esta descripción.

5 El sensor óptico y el sistema de detección de hidrógeno que emplea el mismo están configurados de tal manera que, durante el funcionamiento, la capa de detección se sumerge en el líquido aislante del equipo eléctrico. La respuesta óptica puede incluir transmisión, reflexión, absorción y/u otras propiedades detectables por los dispositivos típicos de detección de luz.

10 De acuerdo con un aspecto, la respuesta óptica es una reflexión, y el sensor óptico (más precisamente, su capa de detección) va montado (por ejemplo, laminado o recubierto) en una parte extrema de un sustrato de guía de luz que conecta el sensor óptico a la fuente de luz y al dispositivo de detección de luz (posiblemente también a través de otros materiales conductores ópticos). En particular, el sustrato de guía de luz es una fibra óptica, en la que la capa de detección está revestida a una superficie extrema de un núcleo de la fibra óptica. Típicamente, la capa de detección forma parte de una estructura multicapa, que también comprende una capa de catalizador que incluye Paladio (Pd). Además, pueden disponerse capas auxiliares que comprenden Titanio (Ti) entre el núcleo de la fibra óptica y la capa de detección, y entre la capa de detección y la capa de catalizador. También, típicamente, la capa más externa de la multicapa es una capa de revestimiento, que protege/cubre la capa de detección y la capa de catalizador del líquido aislante, que típicamente se encuentra presente en forma de volumen de aceite.

15 En aspectos, las capas auxiliares de la multicapa pueden incluir una capa de adhesión (o capa de adhesivo) interpuesta entre la capa de detección y el sustrato de guía de luz que es, en particular, el núcleo de una fibra óptica. Otra capa auxiliar puede ser una capa de separación entre la capa de catalizador y la capa de detección. La capa de catalizador comprende típicamente un metal catalizador para separar moléculas de hidrógeno del líquido aislante, también denominado aquí fluido, a átomos de H individuales. Por ejemplo, la capa puede comprender Pd o una aleación de Pd, por ejemplo, Pd-Au, Pd Cu, Pd-Ag.

20 En aspectos, la capa de protección puede ser un revestimiento de PTFE, o un revestimiento de PMMA, SiO<sub>2</sub>, óxido de aluminio, o puede ser una estructura multicapa que comprenda una combinación de dos o más capas que cada una comprenda los primeros materiales. La capa de protección puede cubrir la capa de catalizador y la capa de detección en el lado orientado hacia el líquido aislante del sensor óptico, cubriendo preferiblemente todo el lado orientado hacia el líquido aislante de la multicapa. La capa de protección es típicamente permeable al hidrógeno, pero menos permeable (o mejor: no permeable) respecto a por lo menos algunos otros componentes del líquido aislante, por ejemplo, otros gases disueltos en el mismo tales como O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y/o CO, y los componentes líquidos del propio líquido/aceite aislante. El efecto protector es deseable, ya que algunos de estos gases o componentes de aceite distintos del hidrógeno pueden afectar a la precisión de detección del sensor óptico, o pueden influir y/o deteriorar su integridad física y/o sensibilidad y propiedades catalíticas cuando están en contacto con la capa de detección o la capa de catalizador. En particular, una intoxicación permanente o reversible de la capa de detección con un gas distinto del gas a detectar puede influir negativamente en la precisión de detección.

25 En aspectos, la capa de detección de hidrógeno comprende una aleación metálica que varía su respuesta óptica en función de la cantidad de hidrógeno presente en el fluido que rodea al sensor óptico y, de este modo, también la capa de detección, por lo tanto, típicamente el líquido aislante, en particular el aceite utilizado para aislamiento de un dispositivo eléctrico.

30 El sensor óptico de acuerdo con aspectos, que incluye una película fina de una aleación metálica como capa de detección, comprende típicamente una fibra óptica multimodo en combinación con una configuración de micro-espejo de punta de fibra que incluye esa capa de detección. El micro-espejo comprende la multicapa descrita anteriormente. Con el fin de medir la concentración de hidrógeno de manera continua, un metal que genera un único hidruro como capa de detección tal como, por ejemplo, Pd o Mg, no es adecuado debido a la transición de fase metal-hidruro a una presión y temperatura meseta únicas, o debido a características de "isoterma de transmisión de presión" limitadas. Por lo tanto, es necesario alear la película fina metálica con otro(s) metal(es) adecuado(s) para obtener una isoterma de transmisión de presión con una pendiente no despreciable en el intervalo de presión y temperatura deseado. Al impurificar una aleación a base de Mg-Ni con un átomo relativamente grande tal como Zr, Ta o Hf, la aleación se vuelve principalmente amorfa, o por lo menos muestra las características de una aleación amorfa: un grupo de estas aleaciones de acuerdo con realizaciones muestra una relación bien definida entre su respuesta óptica (por ejemplo, reflectancia) y la presión parcial de hidrógeno aplicada debido a su amorfismo. Se encontró que, para algunas aleaciones particulares, la isoterma de transmisión de presión tiene características particularmente útiles en la concentración de hidrógeno e intervalo de temperaturas que es de interés para medir presiones parciales de hidrógeno en los líquidos aislantes de equipos eléctricos, en particular transformadores de potencia. Se encontró que, con una aleación a base de Mg-Ni-M como capa de detección de hidrógeno, donde M es Zr, Ta o Hf, es posible monitorear continuamente la concentración de hidrógeno en el aceite de un transformador de

potencia en funcionamiento y, de este modo, comprobar el estado de ese transformador de potencia. Por lo tanto, en realizaciones, utilizando un único sistema a base de fibra óptica - o incluso un sistema a base en multifibras - y un sistema de lectura de salida en línea en tiempo real, es posible comprobar el estado del transformador en cualquier momento e incluso localizar posibles defectos. También, se encontró que, en tales realizaciones, los hidruros metálicos complejos a base de Mg pueden cubrirse con recubrimientos protectores que incluyen PMMA, PTFE, SiO<sub>2</sub>, y óxido de aluminio, en particular Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

En aspectos, otros ejemplos de aleaciones de Mg que pueden utilizarse que tienen características ópticas diferentes cuando se utilizan en un sensor óptico son compuestos de Mg tales como compuestos de Mg-Ni y compuestos de Mg-Ti, o Mg, V, Y u otros compuestos de los mismos. Particularmente, los compuestos de Mg-Ni que muestran este efecto son Mg<sub>2</sub>Ni. Por ejemplo, el Mg<sub>2</sub>Ni tiene una reflectividad relativamente alta, pero bajo la influencia del hidrógeno circundante por lo menos parte del mismo se convierte en Mg<sub>2</sub>NiH<sub>4</sub>, que es mucho menos reflectante a temperatura ambiente. Sin embargo, estas aleaciones, cuando se utilizan en una capa de detección tal como se ha descrito anteriormente, tienen propiedades ópticas diferentes de las aleaciones de Mg-Ni-M descritas anteriormente y son, por lo tanto, adecuadas para otros intervalos, o intervalos parcialmente superpuestos, de temperatura y presiones parciales de hidrógeno.

Haciendo uso del fenómeno que se acaba de describir, en aspectos pueden combinarse por lo menos dos sensores ópticos en un sistema de detección de hidrógeno, cada uno de los cuales tiene un intervalo de trabajo óptimo respecto a un intervalo de temperaturas específico y presión parcial de hidrógeno de interés y, de este modo, se utilizan para complementarse entre sí con el fin de ampliar el intervalo de medición global del sistema de detección de hidrógeno. Por tanto, en aspectos, un sistema de detección de hidrógeno puede comprender, además del primer sensor óptico descrito anteriormente, un segundo sensor óptico que presente una segunda capa de detección, que también varíe su respuesta óptica (por ejemplo, reflectancia) respecto a la luz recibida, dependiendo de una presión parcial de hidrógeno en el fluido en contacto con la capa de detección. De este modo, cada uno de los dos, o también tres o más, sensores ópticos que tienen capas de detección diferentes puede conectarse ópticamente a una fuente de luz común, a su fuente de luz individual, y/o a una sección de detección de luz separada. Además, pueden emplearse varios sensores ópticos idénticos en diferentes posiciones de un dispositivo con el fin de obtener adicionalmente información acerca de la localización de un fallo.

A continuación, se describe con mayor detalle un (primer) sensor óptico y aspectos relacionados. Un dispositivo de detección de luz está conectado ópticamente al sensor óptico que comprende la multicapa con la capa de detección, la capa de catalizador, una o más capas auxiliares y la capa protectora, para recibir luz que ha interactuado con la capa de detección del sensor óptico. Por lo tanto, una amplitud (y/u opcionalmente otras propiedades, tales como, por ejemplo, fase y/o polarización) de la luz recibida por el dispositivo de detección de luz depende de la respuesta óptica de la capa de detección del sensor óptico. El dispositivo de detección de luz produce una señal de salida S1 que se envía a unidad de control.

La unidad de control, en aspectos, también recibe una señal de temperatura de un sensor de temperatura, que mide la temperatura del fluido, que es el líquido o aceite aislante, adyacente al sensor óptico. El sensor de temperatura puede estar íntimamente integrado con el sensor óptico, o también puede estar situado a una distancia de éste - en este último caso debe asegurarse que la temperatura medida pueda calcularse en una relación definida respecto a la temperatura del fluido en el sensor óptico.

En algunos aspectos, la unidad de control puede enviar una señal que sea proporcional a la cantidad de luz recibida en la misma, que depende de la cantidad de hidrógeno, o la presión parcial, en el fluido circundante en la ubicación del sensor óptico. Además, la unidad de control puede enviar una señal análoga S2 que sea proporcional a la presión parcial medida.

De acuerdo con aspectos, la unidad de control comprende una sección de entrada para recibir una señal S1 desde el dispositivo de detección de luz, que detecte la luz de la fuente de luz después de ser reflejada en el sensor óptico. Un analizador de señales en la unidad de control sirve para analizar la señal de salida del dispositivo de detección de luz. El dispositivo de detección de luz puede ser, por ejemplo, un fotodiodo, un analizador de espectro u otros dispositivos conocidos principalmente adecuados para analizar la luz reflejada desde el sensor óptico. Si se analiza adicionalmente la polarización de la luz reflejada, también puede emplearse un filtro de polarización o similar en el dispositivo de detección de luz.

La unidad de control puede comprender un elemento de salida visual, que esté configurado para mostrar una señal dependiendo del nivel de hidrógeno detectado. Por ejemplo, el nivel de hidrógeno puede enviarse a una pantalla numérica que tenga pantallas de siete segmentos, o a un monitor tal como un monitor LCD. Además, la unidad de control puede estar configurada para calcular una desviación oportuna de la señal de hidrógeno y para mostrar una alerta, por ejemplo, como luz roja, cuando la desviación es positiva o supera un valor límite, indicando un aumento

de la concentración de hidrógeno, lo cual se considera que está provocado por un fallo en el dispositivo eléctrico tal como el transformador que se monitoriza.

Además, el sensor óptico, en algunos aspectos, puede ir acompañado de una unidad termostática, que esté dispuesta para mantener una temperatura del primer (y, si está presente, segundo, tercer, etc.) sensor óptico dentro de un intervalo de temperaturas predeterminado. El calentador, por ejemplo, puede estar configurado para activarse y/o desactivarse periódicamente de acuerdo con un ciclo de temperatura, o puede estar adaptado para mantener una temperatura del sensor o sensores ópticos dentro de un intervalo predeterminado. Por lo tanto, el sensor siempre trabaja a la misma temperatura, lo que elimina una variable (temperatura) del proceso de detección, lo cual potencialmente permite una mayor precisión de detección.

De acuerdo con aspectos, se dispone un equipo eléctrico con un líquido aislante, en el que el sensor óptico descrito aquí está sumergido en el líquido aislante (es decir, sumergido parcialmente de manera que el sensor óptico queda por lo menos en contacto parcial con el líquido aislante).

#### Descripción detallada de las figuras y realizaciones

La figura 1 muestra una multicapa 20 de un sensor óptico 10 de acuerdo con realizaciones. La multicapa 20 comprende una capa de detección 24, que está compuesta por una aleación metálica. La aleación comprende Mg, Ni y un componente M, en el que M es por lo menos uno de Zr, Ta y Hf. La aleación tiene la composición  $Mg_xNi_yM_z$ , en la que x es entre 40 y 60, y es entre 10 y 40 y z es entre 10 y 40, en combinaciones en las que los números suman 100. La capa de catalizador 26 comprende Pd o una aleación de Pd. Entre la capa de catalizador 26 y la capa de detección 24 se dispone típicamente una capa auxiliar (no mostrada, véase la figura 3) en realizaciones con el fin de separar físicamente las dos capas y bloquear átomos de cualquier capa para desviarse debido a la difusión hacia la otra capa, lo cual no sería deseable. Este efecto de bloqueo también podría llevarse a cabo mediante un tratamiento superficial antes de disponer la capa de catalizador sobre la capa de detección lo que, sin embargo, no se probó.

En realizaciones, la multicapa 20 comprende una capa de detección con una de las aleaciones con la composición básica  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$  y  $Mg_{55}Ni_{27}Ta_{18}$ , en el que la cantidad individual de los componentes puede desviarse en  $\pm 15\%$ . En la figura 2 se ha representado el logaritmo de la transmisión normalizada para la luz de una longitud de onda de 635 nm de una multicapa tal como se muestra en la figura 1, donde la capa de catalizador comprende Pd, y la capa de detección comprende  $Mg_{52}Ni_{24}Zr_{24}$ , de acuerdo con realizaciones. De esta manera, el logaritmo de la transmisión se representa sobre la temperatura inversa. Se observa una dependencia de temperatura bien definida, es decir, para una temperatura creciente, el contraste óptico disminuye. Como primera aproximación, la respuesta óptica puede describirse mediante una dependencia lineal inversa de la temperatura para una cierta presión parcial de hidrógeno. Además, existe una relación casi directamente proporcional entre el logaritmo de la transmisión - respecto a una reflectancia de referencia  $T_0$  - en un intervalo de temperaturas de 100 °C ( $1/T = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) y temperatura ambiente 20 °C ( $1/T = 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). En este intervalo de temperaturas, también existe una variación significativa del contraste óptico en dependencia de la presión parcial de hidrógeno, expresado por la diferencia de contraste entre las gráficas de ejemplo representadas para una presión parcial de hidrógeno de 0,01 mbar, 0,1 mbar, 1 mbar, y 3,75 mbar. De acuerdo con lo que encontraron los inventores, la presión parcial de 0,01 mbar corresponde a una concentración de hidrógeno de aproximadamente 0,6 ppm a 60 °C en aceite. De este modo, un sensor óptico con la capa de detección que tiene las propiedades anteriores es capaz de detectar por lo menos una concentración de hidrógeno tan pequeña como 0,6 ppm. Esto es muy por debajo de un umbral de nivel de hidrógeno en el aceite que se sabe que indica un fallo potencial o de desarrollo en un aislamiento de un transformador, que puede definirse como 100 ppm o 150 ppm, solamente como ejemplos no limitativos. Las gráficas representadas y otros datos para rellenar los espacios entre las gráficas representadas, se guardan, en realizaciones, en una tabla de consulta de una unidad de control, de manera que puede determinarse una presión parcial de hidrógeno en tiempo real a partir de la reflectancia medida del sensor óptico que comprende dicho sustrato, y una temperatura medida del sensor óptico o en las proximidades de dicho sensor óptico.

La figura 3 muestra que, con un sensor óptico de acuerdo con realizaciones, que tiene una multicapa 20 con una capa de catalizador 26 que comprende Pd y una capa de detección 24 que comprende  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$ , es posible medir la concentración de hidrógeno en un transformador de aceite entre 25 ppm y 290 ppm a 21 °C. Más importante aún, a temperaturas más altas que son más próximas a las temperaturas de funcionamiento estándar de los transformadores, el intervalo de detección llega a entre 30 ppm y 2500 ppm a 60 °C de una manera continua. El intervalo de detección llega a 80 °C, lo que ya supera la temperatura de funcionamiento estándar de los transformadores de potencia. Por lo tanto, a temperatura ambiente, este sensor óptico ya cubre el mencionado umbral de interés para la detección de fallos del transformador de 150 ppm, y a 60 °C cubre todo el intervalo de detección de interés para la monitorización del transformador.

En la figura 4 se representa, a modo de comparación, el margen de detección para una multicapa similar 20, que comprende una capa de detección 24 que comprende una aleación de  $Mg_{60}Ti_{40}$  previamente conocida. Tal como puede apreciarse, el valor umbral de interés, 150 ppm, sólo puede detectarse desde aproximadamente 60°C hacia arriba con un sensor óptico que tenga dicha capa de detección. Por debajo de esa temperatura, la multicapa 20 no muestra un cambio significativo en la respuesta óptica (en comparación con la concentración de 0 ppm) lo cual sería adecuado para la detección.

Alternativamente, respectivamente, además, una capa de catalizador de Pd 26 que cubre una capa de detección 24 con una aleación de  $Mg_{55}Ni_{27}Ta_{18}$  es también capaz de medir el hidrógeno disuelto en el aceite en el mismo intervalo de concentración que el sensor a base de  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$ , tal como se muestra en la figura 3. Sin embargo, para la misma concentración de hidrógeno, el cambio en la reflexión de la aleación a base de  $Mg_{55}Ni_{27}Ta_{18}$  es menor que el cambio mostrado por el sensor de  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$  cubierto con Pd. Esto da como resultado una menor relación señal/ruido. Por lo tanto, los sensores ópticos con capas de detección 24 de  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$  parecen ligeramente ventajosos respecto a un sensor óptico a base de  $Mg_{55}Ni_{27}Ta_{18}/Pd$ .

Ambos ejemplos descritos para capas de detección de acuerdo con realizaciones, las capas de detección 24  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$  y  $Mg_{55}Ni_{27}Ta_{18}$ , en combinación con las capas de catalizador de Pd 26, muestran una respuesta óptica altamente reproducible tras el ciclo, después de haber sido sometidas previamente a ciclos 15 veces. La operación de someterse previamente a ciclos se realizó llevando a cabo un ciclo de absorción-desorción de hidrógeno con un 4% de  $H_2$  en flujo de argón en fase gaseosa a temperatura ambiente, en el que este ciclo se repitió 15 veces. Se encontró que la operación de someterse previamente a ciclos influye positivamente en una respuesta óptica estable del sensor óptico, posteriormente. Unas mediciones de XRD indicaron que los ciclos no afectan a la microestructura amorfa de la capa de detección, e imágenes de AFM confirmaron que los ciclos no producen deformación, deslaminación o un cambio microestructural grande de una película fina de  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$ . El tiempo de respuesta típico de los sensores ópticos con multicapa 20 con capas de detección 26 tal como se ha descrito anteriormente, cuando se sumergen en aceite del transformador, se encuentra dentro del intervalo de horas. Por lo tanto, el tiempo de respuesta real depende mucho de la concentración de hidrógeno en el aceite.

En la figura 6, se muestra un sensor óptico 10 de acuerdo con realizaciones, que comprende una multicapa 20 tal como se ha descrito anteriormente, con una capa de detección 24 y una capa de catalizador 26. El sensor óptico 10 es adecuado para detectar hidrógeno en un fluido 12 (mostrado esquemáticamente, con círculos más pequeños que representan hidrógeno disuelto en el fluido) que se encuentra en contacto físico con el sensor óptico 10. La multicapa está recubierta en una parte extrema 18 de una fibra óptica 15. Esta última tiene típicamente un diámetro exterior, que incluye recubrimiento y revestimiento, de aproximadamente 230  $\mu m$ , el núcleo 36 tiene un diámetro de aproximadamente 200  $\mu m$ . Se entiende que también son aplicables diámetros de fibra significativamente diferentes. La capa de detección 24 comprende una película de una aleación, en la que la aleación de la capa de detección puede tener las composiciones que se han descrito anteriormente respecto a la figura 1 a la figura 4. La capa de catalizador 26 comprende Pd o una aleación de Pd. La capa de catalizador 26 está recubierta con una capa de revestimiento 28. La capa de revestimiento comprende típicamente PMMA y/o PTFE y/o  $SiO_2$  y/u óxido de aluminio, tal como  $Al_2O_3$ . Además, la capa de revestimiento 28 puede tener una estructura multicapa, que comprende por lo menos dos o más capas de PMMA, PTFE,  $SiO_2$  y óxido de aluminio. Ésta protege la capa de catalizador y la capa de detección del aceite u otro fluido, y bloquea los gases no deseados disueltos en el fluido impidiendo que lleguen a la capa de detección, tal como CO o  $H_2S$ . En realizaciones, el PTFE puede seleccionarse como la capa de revestimiento más externa (si hay presentes varias capas) para proteger de los componentes de aceite.

Tal como se ha expuesto respecto a las figuras 2 y 3, el sensor óptico 10 presenta una disminución continua de la reflectividad óptica en el intervalo óptico visible cuando se expone a una concentración creciente de hidrógeno (medida en ppm) en un fluido 12 en contacto con el sensor óptico 10. Para capas de detección adecuadas de acuerdo con realizaciones, el sensor óptico 10 muestra una dependencia continua de su reflectancia óptica a partir de la concentración de hidrógeno en el intervalo de aproximadamente entre 5 °C y aproximadamente 150°C, y para concentraciones de hidrógeno en el fluido de aproximadamente entre 0,5 ppm y aproximadamente 5000 ppm, más particularmente de aproximadamente entre 2 ppm y aproximadamente 3000 ppm.

El sensor óptico 10 de la figura 6 comprende una capa auxiliar 32 entre la capa de catalizador 26 y la capa de detección 24, que queda en contacto con la capa de detección 24. La capa auxiliar 30 comprende preferiblemente Ti, que es adecuado para bloquear átomos de cualquiera de las capas vecinas para la difusión a la otra capa respectiva. Se dispone una capa auxiliar adicional 30, que también comprende típicamente Ti, como capa adhesiva entre el núcleo 36 de la fibra óptica 15 y la capa de detección 24. En realizaciones, la capa de recubrimiento llega a toda la multicapa 20, es decir, también sobre las caras laterales circunferenciales de la multicapa 20 (no mostrada).

La multicapa 20 se dispone típicamente sobre una superficie extrema 17 de la fibra óptica 15, perpendicular al eje longitudinal de la fibra óptica. En realizaciones, la mayoría o todas las capas de la multicapa 20 se solapan sobre el borde 22 del núcleo 36 para cubrir una parte de la cara lateral circunferencial 34 del núcleo 36 de la fibra óptica 15.

En realizaciones, la multicapa también puede disponerse exclusivamente sobre la cara lateral periférica 34 de la fibra óptica central 15. Además, la multicapa 20, en realizaciones, puede disponerse sobre un sustrato ópticamente transparente (no mostrado) diferente de una fibra óptica.

5 En todas las realizaciones, las dimensiones típicas (es decir, un grosor paralelo al eje longitudinal de la fibra óptica) para las capas variables de la multicapa 20 son: Capas auxiliares de 2 a 7 nm, más típicamente de 4 a 6 nm, por ejemplo 5 nm. La capa de detección es típicamente de 30 a 80 nm, más típicamente de 40 a 70 nm, por ejemplo 60 nm de grosor. La capa de catalizador 26 es típicamente de 15 nm a 50 nm, más típicamente de 20 a 40 nm, por ejemplo 30 nm de grosor. El grosor de la capa de recubrimiento puede variar dependiendo de su configuración individual, en particular si comprende varias capas de materiales diferentes, tal como se describe aquí. Por lo tanto, puede tener un grosor de 3 nm a 5  $\mu\text{m}$ , más típicamente de 20 nm a 3  $\mu\text{m}$ , por ejemplo 1  $\mu\text{m}$  o 2  $\mu\text{m}$ . También debe observarse que las proporciones en las figuras no son a escala. Por ejemplo, la fibra óptica 15 de la figura 6 tiene un diámetro de aproximadamente 230  $\mu\text{m}$ , mientras que las capas individuales están en el intervalo de unos pocos nm a unos pocos  $\mu\text{m}$ , tal como se acaba de describir. Por lo tanto, su altura o grosor (en una dirección vertical en el plano del dibujo) es significativamente menor, en realidad, respecto a la dimensión horizontal de la fibra.

Esquemáticamente, se muestra un haz de luz entrante 41 que se refleja en la capa de detección 24 y se refleja de nuevo en la fibra óptica 15 como haz de luz 42. La fibra óptica 15 es típicamente una fibra multimodo, la longitud de onda puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 635 nm, pero también es aplicable cualquier otra longitud de onda en el intervalo óptico visible con las capas de detección 24 tal como se describe aquí. La posición exacta en la que la luz se refleja en la capa de detección de la figura 6 se selecciona aleatoriamente sólo con fines ilustrativos.

En la figura 7, se muestra un sistema de detección 50 para hidrógeno en fluidos. Éste comprende el sensor óptico 10 tal como se ha descrito anteriormente. Además, comprende un sensor de temperatura 52, una fuente de luz 55, un dispositivo de detección de luz 58, un divisor óptico 57 y una unidad de control 70. La luz procedente de la fuente de luz 55 es guiada hacia el sensor óptico 10 mediante el divisor 57. En el sensor óptico 10, la capa de detección 24 de la multicapa 20 (ambos no mostrados) refleja parte de la luz entrante. La luz reflejada se refleja de nuevo a través del divisor 57 y es detectada por el dispositivo de detección de luz 58. Este último produce una señal de salida S1 dependiendo de la amplitud de la luz reflejada recibida. La unidad de control 70 procesa la señal de salida S1 del dispositivo de detección de luz 58. Éste determina una concentración de hidrógeno y envía una señal de salida S2 respectiva. De este modo, tiene en cuenta la temperatura T que se suministra desde el sensor de temperatura 52. De este modo, la unidad de control 70 hace uso de los datos almacenados en una tabla de consulta. Los datos almacenados comprenden datos de reflectancia característicos del sensor óptico 10 para una variedad de temperaturas (en el intervalo de interés, por ejemplo, entre 10 °C y 100 °C) y una variedad de presiones parciales de hidrógeno en un fluido 12 (no mostrado) que rodea al sensor óptico 10. De este modo, el sistema de detección 50 proporciona una señal de salida S2 dependiendo de la concentración de hidrógeno calculada en el fluido 12, que se calcula a partir de los valores medidos para la temperatura y la reflectancia. La señal S2 se determina a partir de la reflectancia del sensor óptico 10 y de la temperatura. De este modo, la señal de salida S2 en las realizaciones es típicamente una función continua de la concentración de hidrógeno en el fluido 12. El sistema de detección típicamente suministra una disminución continua de la señal de salida S2 en una región de temperatura entre 5 °C y 150 °C y, para concentraciones de hidrógeno en el fluido 12 de aproximadamente entre 0,5 ppm y aproximadamente 5000 ppm, más típicamente de aproximadamente entre 2 ppm y aproximadamente 3000 ppm.

Alternativamente al uso de una tabla de consulta, la concentración de hidrógeno puede calcularse mediante la unidad de control 70 a partir de un conjunto de funciones almacenadas, teniendo en cuenta por lo menos los parámetros de reflectividad del sensor óptico 10 y la temperatura desde el sensor de temperatura 52.

Se entiende que los sensores ópticos 10 y los sistemas de detección descritos tienen que ser caracterizados antes de su uso con el fin de obtener los datos mencionados anteriormente sobre la relación entre la presión parcial de hidrógeno, la temperatura y la reflectancia del sensor óptico. Como tales sensores ópticos pueden reproducirse con alta precisión, esto sólo podría ser necesario para un prototipo. Los datos obtenidos pueden ser reutilizados entonces en el proceso de producción en masa.

En la figura 8 se muestra un dispositivo eléctrico 100. Incluye un sistema de detección de hidrógeno 50 tal como se ha descrito respecto a la figura 7. El dispositivo 100 es generalmente un dispositivo para la generación, transmisión o distribución de energía eléctrica, y más típicamente un transformador de potencia o transformador de distribución. Comprende un volumen de aceite 110 para fines de aislamiento y refrigeración, en el cual están sumergidos el sensor óptico 10 y el sensor de temperatura 52. Más precisamente, la parte extrema 18, con la multicapa 20, de la fibra óptica 15 está sumergida en el volumen de aceite 110. El sensor de temperatura 52 se dispone para medir la temperatura del aceite directamente en la multicapa 20 del sensor óptico 10 o adyacente a la misma. El aceite es representativo del fluido 12 mostrado en otras figuras aquí.

Aunque pueden mostrarse características específicas de varias realizaciones de la invención en algunos dibujos y en otros no, esto es solamente por conveniencia. De acuerdo con los principios de la invención, cualquier característica de un dibujo puede referenciarse y/o reivindicarse en combinación con cualquier característica de cualquier otro dibujo.

5 Esta descripción escrita utiliza ejemplos para describir la invención, incluyendo el mejor modo, y también para permitir a cualquier persona experta en la materia poner en práctica la invención, incluyendo realizar y utilizar cualquier dispositivo o sistema y llevar a cabo cualquier método incorporado. Aunque anteriormente se han descrito  
10 diversas realizaciones específicas, los expertos en la materia reconocerán que el espíritu y el alcance de las reivindicaciones permiten modificaciones igualmente eficaces. Especialmente, pueden combinarse entre sí características mutuamente no exclusivas de las realizaciones descritas anteriormente. El alcance patentable de la invención está definido por las reivindicaciones, y puede incluir otros ejemplos contemplen los expertos en la  
15 materia. Estos otros ejemplos pretenden encontrarse dentro del alcance de las reivindicaciones si tienen elementos estructurales que no difieran del lenguaje literal de las reivindicaciones, o si incluyen elementos estructurales equivalentes con diferencias no substanciales con el lenguaje literal de las reivindicaciones.

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Sensor óptico (10) para detectar hidrógeno en un fluido (12) en contacto físico con el sensor óptico, que comprende una fibra óptica (15), en la que una parte extrema (18) de la fibra óptica está recubierta con una multicapa (20) que comprende:
- 10 - una capa de detección (24), que comprende una película de una aleación, comprendiendo la aleación Mg, Ni y M, donde M es por lo menos uno de Zr, Ta y Hf, y en el que la aleación tiene la composición  $Mg_xNi_yM_z$ , y donde x es entre 40 y 60, y es entre 10 y 40 y z es entre 10 y 40,  
 - una capa de catalizador (26) que comprende Pd.
- 15 2. Sensor óptico de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por el hecho de que la aleación comprende por lo menos uno de  $Mg_{52}Ni_{20}Zr_{28}$ ,  $Mg_{52}Ni_{24}Zr_{24}$ , y  $Mg_{55}Ni_{27}Ta_{18}$ .
- 15 3. Sensor óptico de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado por el hecho de que la multicapa (20) comprende la capa de detección (24), la capa de catalizador (26) y una capa de revestimiento (28).
- 20 4. Sensor óptico de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado por el hecho de que la capa de revestimiento (28) comprende PMMA y/o PTFE y/o  $SiO_2$  y/u óxido de aluminio, o tiene una estructura multicapa que comprende por lo menos dos de PMMA, PTFE,  $SiO_2$  y óxido de aluminio.
- 25 5. Sensor óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que está adaptado para presentar una disminución continua de la reflectividad óptica en el intervalo óptico visible en dependencia de una presión parcial creciente de hidrógeno en un fluido (12) en contacto con el sensor óptico (10).
- 30 6. Sensor óptico de acuerdo con la reivindicación 5, caracterizado por el hecho de que la disminución continua se produce en una región de temperaturas entre 5°C y 150°C y para una presión parcial de hidrógeno entre 0,5 ppm y 5.000 ppm.
- 30 7. Sensor óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que comprende, además, por lo menos una capa auxiliar (30, 32) contigua a la capa de detección (24), la capa auxiliar comprendiendo preferiblemente Ti.
- 35 8. Sensor óptico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por el hecho de que la multicapa (20) está dispuesta sobre una superficie extrema (17) de la fibra óptica (15) perpendicular al eje longitudinal de la fibra óptica (15) y, opcionalmente, se superpone sobre el borde (22) para cubrir una parte de la cara lateral circunferencial (34) del núcleo (36) de la fibra óptica (15).
- 40 9. Sistema de detección (50) para hidrógeno en fluidos, que comprende el sensor óptico (10) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, un sensor de temperatura (52), una fuente de luz (55), un dispositivo de detección de luz (58) y una unidad de control (70), en el que la luz procedente de la fuente de luz (55) puede ser guiada hacia el sensor óptico (10), la luz reflejada por la multicapa (20) del sensor óptico (10) puede ser detectada por el dispositivo de detección de luz (58), y en el que la unidad de control (70) está adaptada para procesar una señal de salida S1 del dispositivo de detección de luz (58), determinar una concentración de hidrógeno, y enviar una señal de salida S2 respectiva.
- 45 10. Sistema de detección de acuerdo con la reivindicación 9, caracterizado por el hecho de que la unidad de control (70) está adaptada para proporcionar una señal de salida S2 dependiendo de la concentración de hidrógeno determinada a partir de la reflectividad del sensor óptico (10) y la temperatura, y en el que la señal de salida S2 es una función continua de la concentración de hidrógeno en el fluido (12).
- 50 11. Sistema de detección de acuerdo con la reivindicación 10, caracterizado por el hecho de que está adaptado para suministrar un cambio continuo de la señal de salida S2 en una región de temperaturas entre 5 °C y 150 °C y para una presión parcial de hidrógeno en el fluido (12) entre 0,5 ppm y 5.000 Ppm.
- 55 12. Sistema de detección de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, caracterizado por el hecho de que la unidad de control (70) está adaptada para determinar la concentración de hidrógeno buscando datos almacenados sobre la reflectividad del sensor óptico (10) a diversas presiones parciales de hidrógeno y temperaturas y/o para determinar la concentración de hidrógeno a partir de un conjunto de funciones almacenadas, teniendo en cuenta por lo menos los parámetros de reflectividad del sensor óptico (15) y la temperatura.
- 60 13. Dispositivo (100) para la generación, transmisión o distribución de energía eléctrica, que comprende un volumen de aceite (110), y un sistema de detección (50) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12.

14. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 13, caracterizado por el hecho de que la parte extrema (18) de la fibra óptica (15) puede estar sumergida en el volumen de aceite (110), y en el que el sensor de temperatura (52) está dispuesto para medir la temperatura del aceite adyacente a la multicapa (20) del sensor óptico (10).

5

15. Uso de una película fina de una aleación en un sensor de hidrógeno, comprendiendo la aleación Mg, Ni y M, donde M es por lo menos uno de Zr, Ta y Hf, y en el que la aleación tiene la composición  $Mg_xNi_yM_z$ , y en el que x es entre 40 y 60, y es entre 10 y 40 y z es entre 10 y 40.

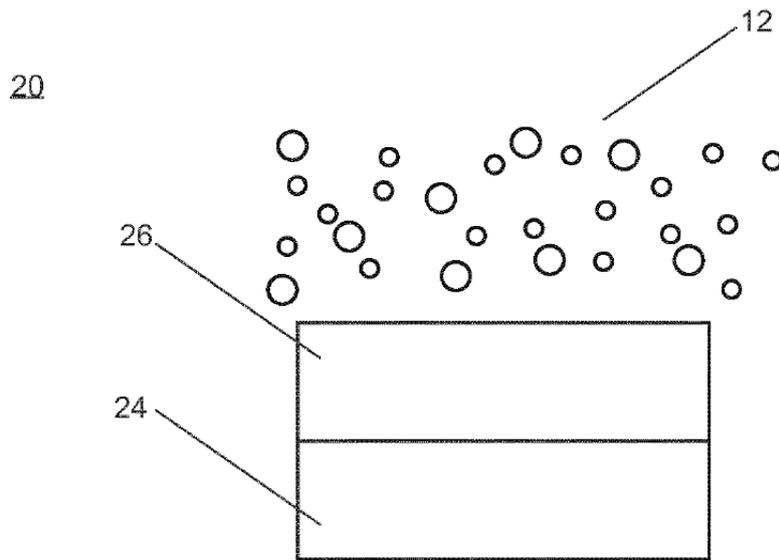


Fig.1

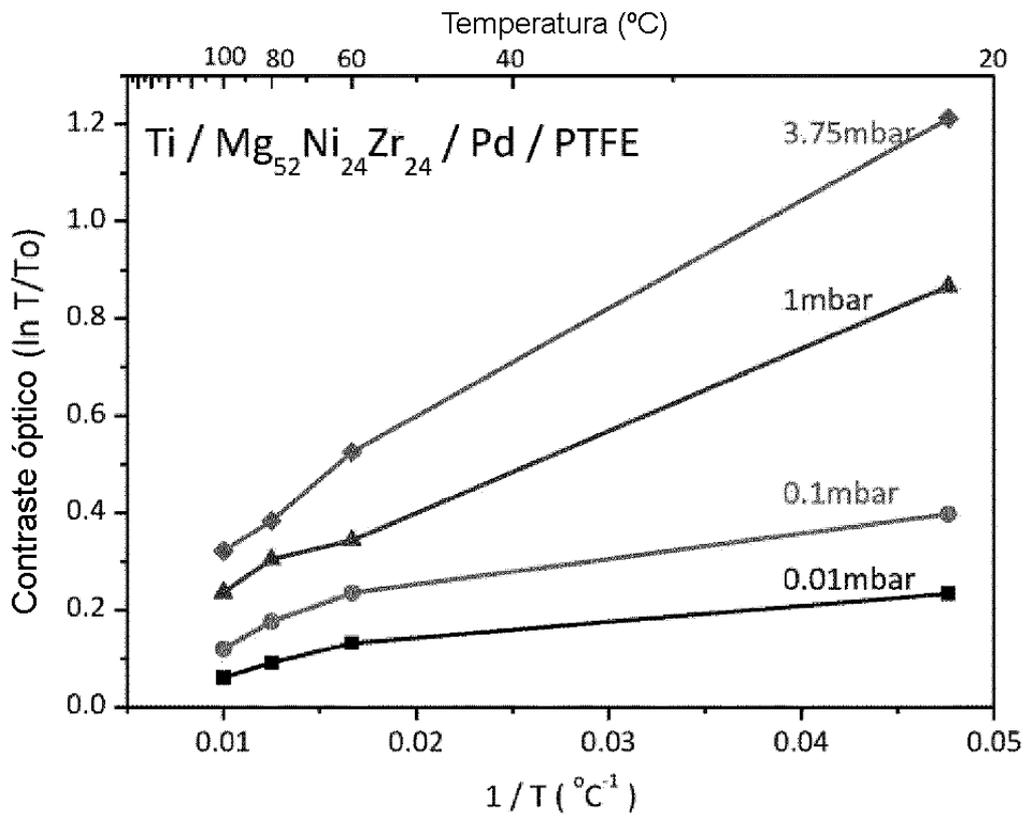


Fig.2

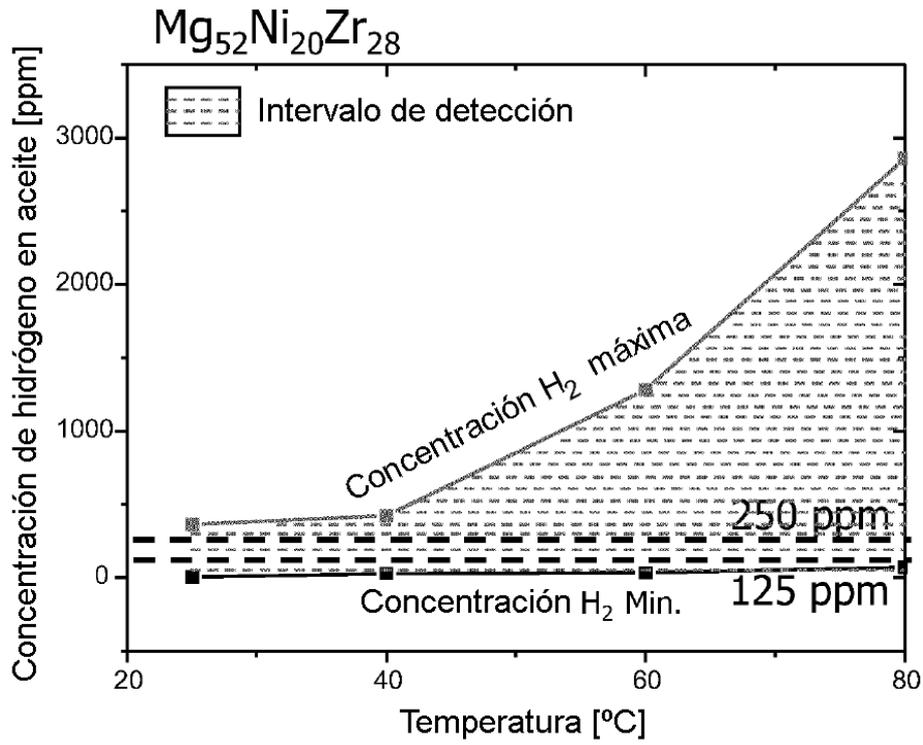


Fig.3

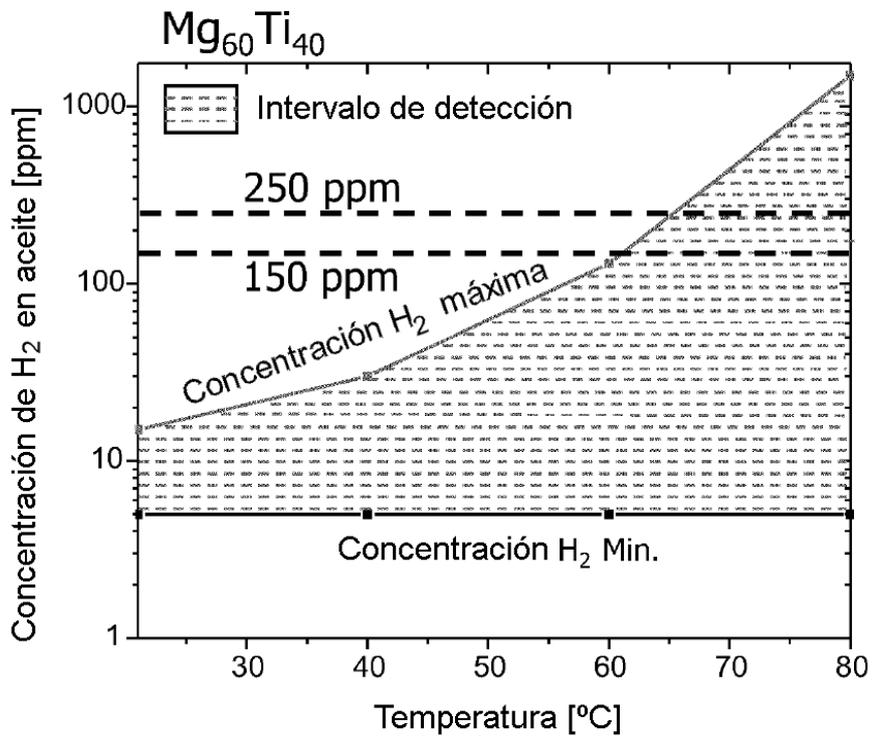


Fig.4

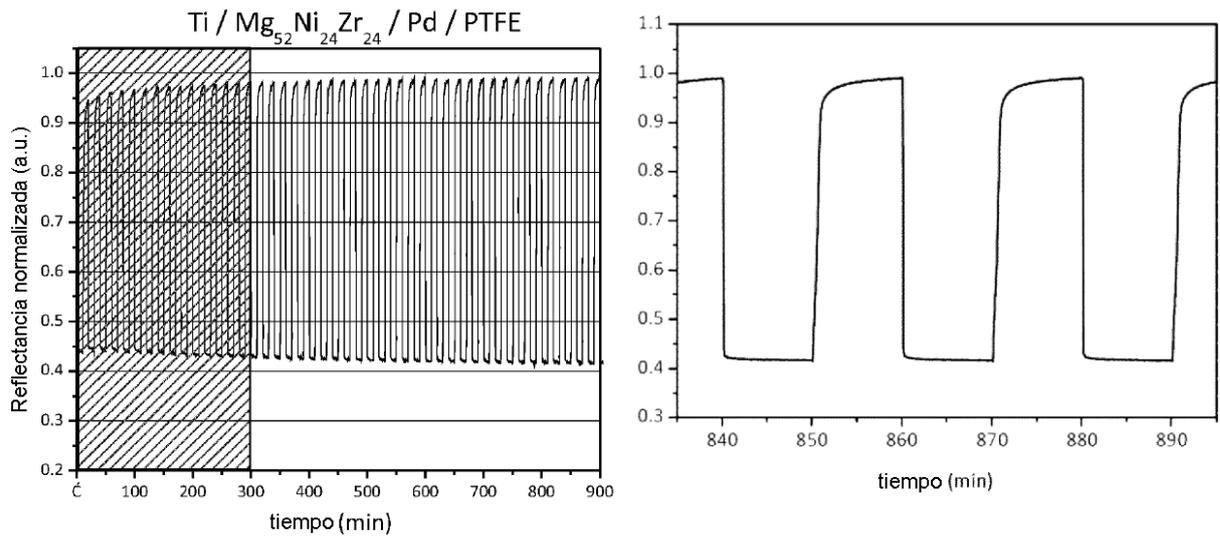


Fig.5

10

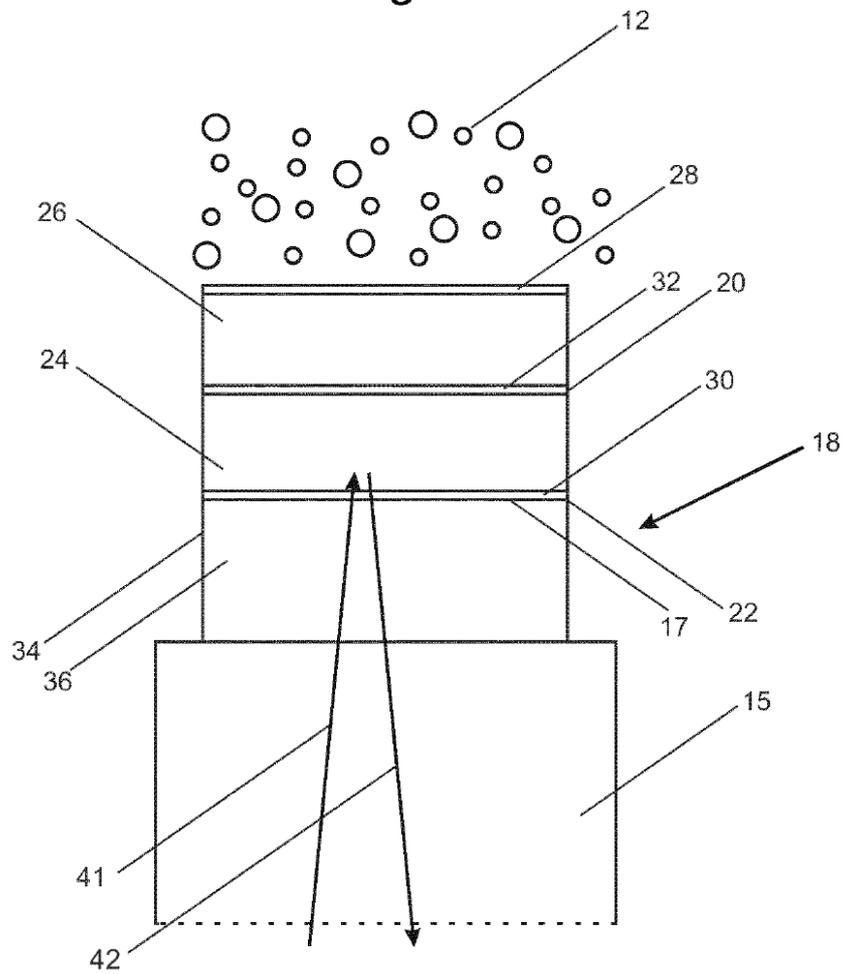


Fig.6

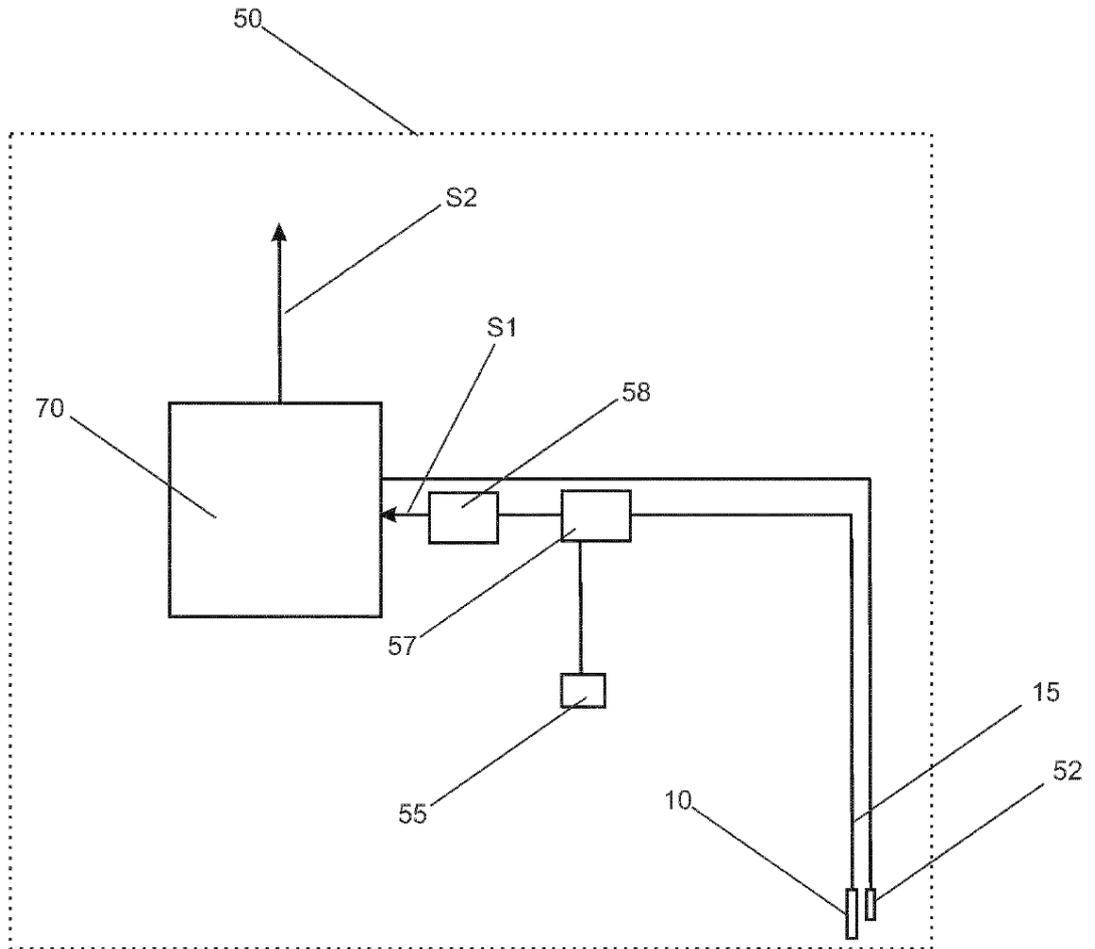


Fig.7

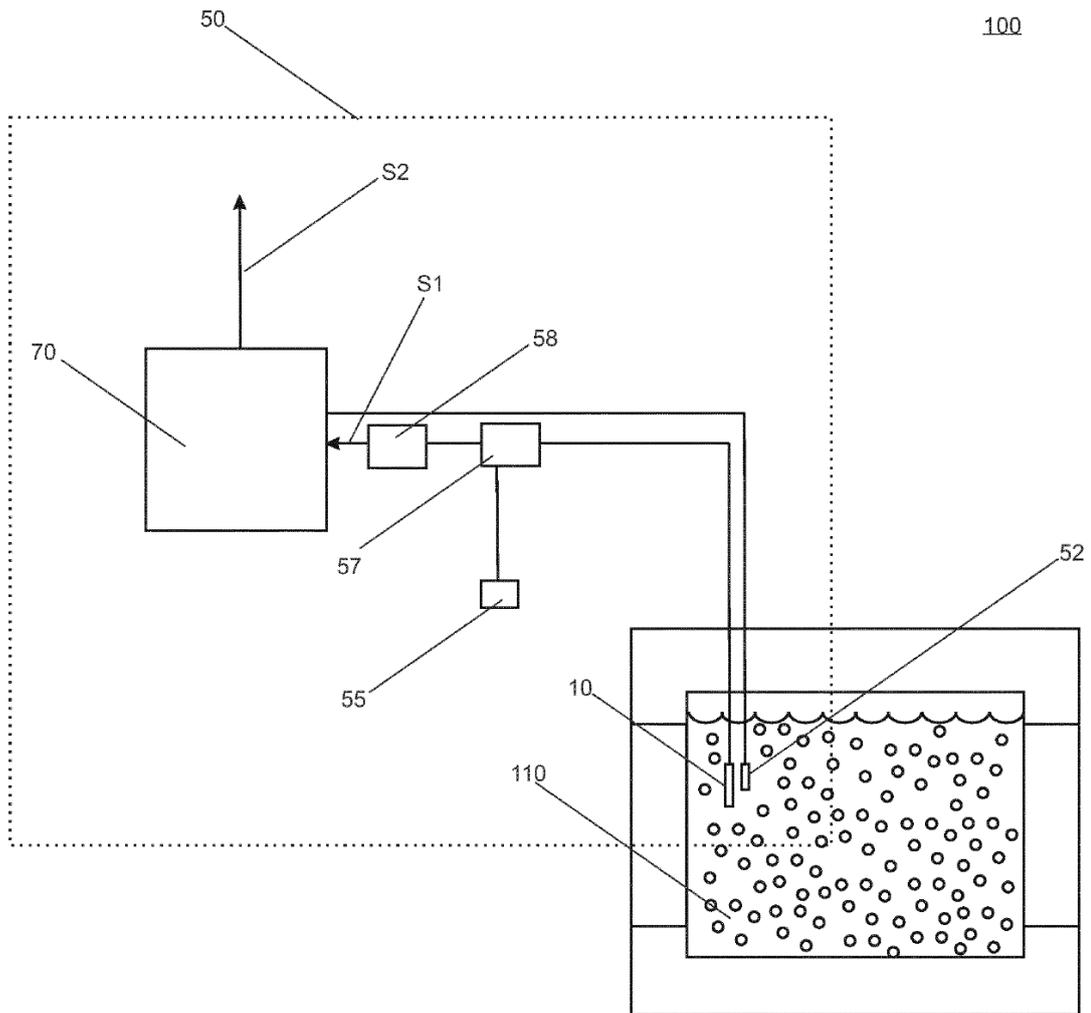


Fig.8

**REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN**

5 *Esta lista de referencias citadas por el solicitante es únicamente para la comodidad del lector. No forma parte del documento de la patente europea. A pesar del cuidado tenido en la recopilación de las referencias, no se pueden excluir errores u omisiones y la EPO niega toda responsabilidad en este sentido.*

**Documentos de patentes citados en la descripción**

10 • WO 2007049965 A1 [0009]

**Literatura no de patentes citada en la descripción**

15 • **MAK; R. J. WESTERWAAL; M. SLAMAN; H. SCHREUDERS; A. W. VAN VUGT; M. VICTORIA; C. BOELSMA; B. DAM.** *Optical fiber sensor for the continuous monitoring of hydrogen in oil. Sensors and Actuators B*, 2014, vol. 190, 982-989 [0010]

• **SLAMAN y otros.** *Fiber optic hydrogen detectors containing Mg-based metal hydrides. Sensors and Actuators B*, 30 March 2007, vol. 123 (1), 538-545 [0011]