

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 609 771**

51 Int. Cl.:

G01H 9/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.04.2012 PCT/DK2012/050128**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.10.2012 WO2012139592**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.04.2012 E 12714937 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.11.2016 EP 2697613**

54 Título: **Turbina eólica que incluye un sistema sensor óptico**

30 Prioridad:

13.04.2011 DK 201170174

13.04.2011 US 201161474765 P

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

24.04.2017

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

OLESEN, IB SVEND

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 609 771 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

Turbina eólica que incluye un sistema sensor óptico

La presente invención se refiere a un sistema sensor óptico para una turbina eólica y a una turbina eólica que incorpora un sistema sensor de este tipo. La invención encuentra aplicación particular en la detección de turbulencia o en la monitorización de vibración de un componente de turbina eólica.

Para optimizar la extracción de energía del viento, las turbinas eólicas normalmente están equipadas con numerosos dispositivos sensores, que pueden proporcionar realimentación a los sistemas de control de la turbina. Por ejemplo, dispositivos sensores se usan habitualmente para monitorizar condiciones ambientales en la turbina eólica así como para medir parámetros de los componentes de turbina eólica, tales como tensión. Usando los datos obtenidos de estos dispositivos sensores, la turbina eólica puede accionarse en consecuencia, tal como controlando el paso de las palas. También puede ajustarse la guiñada de la góndola para hacer la turbina eólica lo más eficiente posible a la hora de generar energía.

Los dispositivos sensores también se usan habitualmente para monitorizar el estado de los componentes de turbina eólica de modo que pueda detectarse el daño al componente o el deterioro en el estado del componente y pueda llevarse a cabo el mantenimiento necesario lo antes posible. Esto ayuda a mejorar la vida útil de los componentes y evita el fallo prematuro o completo de la turbina eólica. Además, como ciertos tipos de daño pueden afectar de manera adversa al funcionamiento de la turbina eólica, el mantenimiento eficiente de los componentes de turbina eólica garantiza que la turbina eólica puede funcionar de la manera más eficiente posible. Tales sistemas sensores son particularmente importantes para turbinas eólicas ubicadas en zonas remotas, tales como zonas marítimas, costales o elevadas, en las que el tiempo y el coste asociados con el mantenimiento son relativamente altos.

Debido a la altura de la mayoría de turbinas eólicas, el daño por impactos de rayos es un problema operativo recurrente. El uso de pararrayos proporciona un modo de llevar la energía de un impacto de rayo de manera segura lejos del componente impactado, que como resultado puede sufrir ningún o mínimo daño. Sin embargo, los pararrayos no siempre protegerán de manera adecuada equipos sensores montados sobre o en componentes de turbina eólica. Sistemas sensores que incorporan componentes metálicos tales como cableado y circuitos son particularmente susceptibles al daño por una descarga eléctrica.

Adicionalmente, el funcionamiento de sistemas sensores en una turbina eólica puede verse afectado de manera adversa por los campos magnéticos y eléctricos asociados con maquinaria eléctrica y mecánica pesada, por ejemplo en la góndola. Como resultado, los sistemas sensores no pueden trabajar de manera óptima.

Por estos motivos, se prefiere generalmente reducir el número de componentes electrónicos usados en sistemas sensores y usar elementos óptimos cuando sea posible.

Un tipo de sensor que ha demostrado ser sensible a perturbación EMC de maquinaria pesada en una turbina eólica, tal como el generador, son micrófonos eléctricos que pueden usarse en sensores acústicos para monitorizar el estado de componentes de turbina eólica basándose en las emisiones de sonido. Por tanto, se ha propuesto anteriormente usar micrófonos "ópticos" para aplicaciones de sensores en turbinas eólicas. Los micrófonos ópticos detectan movimientos de aire usando una membrana que transfiere cualquier oscilación a un haz de luz en lugar de una señal eléctrica.

Por ejemplo, se ha propuesto anteriormente proporcionar turbinas eólicas con sistemas sensores que incorporan uno o más micrófonos ópticos para detectar turbulencia en el flujo de aire en la turbina eólica. En un sistema propuesto, se usan sensores de turbulencia para la detección de la acumulación de materia no deseada, tal como hielo o suciedad, en la superficie de las palas de turbina eólica. En otra aplicación propuesta, se usan sensores de turbulencia similares como parte de un sistema de control que controla un parámetro aerodinámico de una pala de una turbina eólica, tal como ángulo de paso, basándose en medidas de turbulencia. El documento GB 2466433 da a conocer un micrófono óptico de este tipo. También se han propuesto micrófonos ópticos para el uso en lugar de micrófonos eléctricos para detectar vibraciones como parte de un sistema de monitorización de estado para monitorizar el generador u otros equipos dentro de la góndola.

Los micrófonos ópticos conocidos normalmente no han funcionado tan bien como los micrófonos eléctricos tradicionales, en particular, debido a la sensibilidad del micrófono a movimientos de las fibras ópticas asociadas, que provoca que se generen señales falsas. Este problema es particularmente serio en estructuras en movimiento o rotación, tales como turbinas eólicas. El rendimiento de muchos micrófonos ópticos también se ve afectado de manera adversa por el hecho de que el sensor óptico debe unirse a la membrana de sensor, por ejemplo en el caso de un sensor de rejilla de Bragg en fibra. La membrana se hace por tanto más pesada y no es libre para responder de manera precisa a movimientos de aire. Además, en disposiciones existentes para micrófonos ópticos, el aparato de generación y detección de luz requerido es relativamente caro, de modo que no es económicamente factible usar tales sistemas en una escala comercial.

Sería por tanto deseable proporcionar un sistema sensor que incorpora una disposición de micrófono óptico novedosa, que tiene un rendimiento mejorado y que soluciona los problemas asociados con micrófonos ópticos

existentes. Sería particularmente deseable si un sistema de este tipo pudiera formarse a partir de componentes relativamente robustos y de bajo coste de modo que el sistema es más económicamente factible para el uso en parques eólicos. Sería adicionalmente deseable si un sistema de este tipo pudiera adaptarse fácilmente para una variedad de diferentes aplicaciones de sensor en una turbina eólica.

- 5 Según la presente invención se proporciona según las reivindicaciones 1 y 22 una turbina eólica que incluye un sistema sensor óptico que comprende uno o más sensores ópticos, comprendiendo cada sensor: una membrana de sensor reflectante; una fuente luminosa para iluminar una superficie de la membrana de sensor; un elemento dispersivo óptico dispuesto para dispersar el haz de luz de la fuente luminosa; y un detector de luz para recibir una parte del haz de luz tras la reflexión de la superficie de la membrana de sensor y tras la dispersión del haz de luz por el elemento dispersivo óptico. La longitud de onda de la luz recibida en el detector de luz varía en función del desplazamiento de la membrana de sensor y el detector de luz proporciona de manera operativa una salida basándose en cambios en la longitud de onda de la luz recibida. La turbina eólica comprende además un controlador para recibir datos del sistema sensor y basándose en los datos recibidos controlar un parámetro de funcionamiento de la turbina eólica.
- 10
- 15 La expresión “parámetro de funcionamiento” se refiere a cualquier parámetro de la turbina eólica que afecta al funcionamiento de la turbina eólica. El parámetro que va a controlarse basándose en los datos recibidos del sistema sensor óptico dependerá de la función del sistema sensor y se describirán ejemplos a continuación. En determinadas realizaciones, el parámetro de funcionamiento que va a controlarse puede ser un parámetro aerodinámico de la pala de turbina eólica, tal como paso o rpm de rotor. En otras realizaciones, el parámetro de funcionamiento que va a controlarse puede ser un parámetro del generador, tal como carga, potencia o rpm.
- 20

El sensor óptico de las turbinas eólicas de la presente invención proporciona un tipo novedoso de micrófono óptico, que tiene una variedad de posibles aplicaciones en la monitorización de la turbina eólica durante el funcionamiento, tal como se describirá en más detalle a continuación.

- 25 El sensor óptico usado en las turbinas eólicas de la presente invención funciona detectando cambios en la longitud de onda de la luz recibida en el detector de luz, que son indicativos del movimiento de la membrana de sensor con respecto al detector de luz y la fuente luminosa. En el haz dispersado producido por el elemento dispersivo óptico, las diferentes longitudes de onda de luz se extienden o dividen para producir un haz dispersado en “abanico”. Cada longitud de onda de luz viajará a un ángulo ligeramente diferente con respecto a la membrana de sensor, después de que el haz de luz se haya reflejado desde la superficie de la membrana de sensor. La longitud de onda de luz que se recibe en el detector de luz dependerá de la posición de la membrana de sensor con respecto a las posiciones fijas de la fuente luminosa y el detector de luz.
- 30

- El desplazamiento de la membrana de sensor puede derivarse directamente de los cambios medidos en la longitud de onda, basándose en métodos trigonométricos sencillos, dado que las posiciones de la fuente luminosa y el detector de luz, así como la dispersión angular del haz de luz mediante el prisma se conocerán y permanecerán fijas. El patrón de desplazamiento de la membrana de sensor proporciona una indicación del flujo de aire en la superficie de la membrana de sensor, de la misma manera que un micrófono eléctrico convencional.
- 35

- Ventajosamente, la disposición de la presente invención permite que la luz reflejada se detecte sin la necesidad de unir ningún componente de detección directamente a la membrana de sensor, lo que permite que la membrana de sensor se mueva libremente en respuesta a movimientos de aire en la superficie. Como resultado, la membrana de sensor puede responder más rápidamente a los movimientos de aire y proporcionar una indicación más precisa de flujo de aire en la superficie. Por tanto, la disposición de la membrana de sensor se asemeja de manera más cercana a la de un micrófono eléctrico y puede proporcionar un rendimiento alto similar mientras proporciona el beneficio de usar componentes ópticos, en lugar de componentes eléctricos.
- 40

- El sensor usado en la presente invención es altamente sensible e incluso desplazamientos pequeños de la membrana pueden detectarse fácilmente a través de la monitorización de la longitud de onda de la luz reflejada recibida en el detector de luz. Puesto que hay pocas partes móviles, el sensor es resistente a cambios extremos en la temperatura y el funcionamiento del sensor no se verá afectado por cambios en las condiciones, tales como temperatura o humedad. Además, ya que el sensor usa fibras ópticas donde sea posible en lugar de cableado o circuitería metálica, el rendimiento del sensor no se verá afectado por los campos eléctricos o magnéticos de equipos pesados en la proximidad del sensor y se reduce el riesgo de daño debido a impactos de rayos.
- 45
- 50

La fuente luminosa y el detector de luz del sensor usado en la presente invención pueden proporcionarse ventajosamente mediante componentes relativamente económicos y robustos que son relativamente fáciles de instalar y hacer funcionar. Por tanto, la presente invención proporciona un sensor económico que es adecuado para su uso en turbinas eólicas en una escala comercial.

- 55 La fuente luminosa del sensor óptico usado en la presente invención emite un único haz de luz, que se divide en diferentes longitudes de onda mediante el elemento dispersivo óptico para producir un haz dispersado con cada longitud de onda o color diferente refractado a un ángulo diferente. La fuente luminosa puede comprender cualquier dispositivo optoelectrónico adecuado, incluyendo por ejemplo un diodo emisor de luz, un fotodiodo o un láser.

Preferiblemente, la fuente luminosa comprende además una fibra óptica y la salida de luz del dispositivo optoelectrónico se introduce en la fibra óptica, que transmite la luz y dirige la luz a la superficie de la membrana de sensor. Dependiendo de la posición requerida del sensor en la turbina eólica, los componentes optoelectrónicos pueden ubicarse de manera remota de manera que estén protegidos de impactos de rayos.

5 La "luz" emitida por la fuente luminosa puede ser luz visible o puede ser alternativamente un tipo no visible de radiación electromagnética, tal como infrarroja. En una primera realización preferida, la fuente luminosa emite luz a una longitud de onda promedio de aproximadamente 1500 nm. En una segunda realización preferida, la fuente luminosa emite luz a una longitud de onda promedio de aproximadamente 800 nm.

10 El intervalo de longitud de onda del haz de luz emitido desde la fuente luminosa es de manera preferible relativamente estrecho. Por ejemplo, el intervalo de longitud de onda del haz de luz es preferiblemente menor de 10 nm, más preferiblemente de aproximadamente 5 nm. En una realización particularmente preferida, la fuente luminosa emite un haz con un intervalo de longitud de onda de 1500 nm a 1505 nm.

15 El elemento dispersivo óptico divide el haz de luz de la fuente luminosa en sus longitudes de onda constituyentes, en el que cada longitud de onda se refracta mediante un ángulo diferente para dispersar el haz de luz a una forma de abanico o de cono. Por ejemplo, en el caso de un haz de luz visible blanca, el elemento dispersivo óptico descompone la luz en sus colores de espectro constituyentes para producir un haz arco iris dispersado. El elemento dispersivo óptico puede adoptar la forma de uno o más prismas, rejillas de difracción o cualquier otro componente óptico de división de haz.

20 El elemento dispersivo óptico puede montarse en diversas posiciones a lo largo de la trayectoria del haz de luz entre la fuente luminosa y el detector de luz, de manera que la dispersión del haz de luz se produce en un momento diferente con respecto a la reflexión del haz. Sin embargo, en todos los casos pueden usarse los mismos principios de medición para monitorizar cambios en la longitud de onda de la luz recibida en el detector de luz y a partir de esto determinar cualquier movimiento de la membrana de sensor.

25 En una primera realización de la invención, el elemento dispersivo óptico está montado delante de la fuente luminosa, entre la fuente luminosa y la membrana de sensor, de modo que la superficie de la membrana de sensor se ilumina con el haz dispersado. El haz de luz dispersado se envía de manera extendida desde la fuente luminosa e impactará con la superficie de la membrana de sensor en un patrón distribuido. Por tanto, cada longitud de onda de luz se reflejará también de vuelta desde la membrana de sensor a un ángulo ligeramente diferente, de modo que la luz reflejada también está en forma de un haz de "abanico" dispersado. Cualquier movimiento de la membrana de sensor como resultado de un flujo de aire o vibración provocará un movimiento del haz dispersado de modo que una parte diferente del haz se dirige al detector de luz y se recibe una longitud de onda de luz diferente. En la primera realización de la invención, el elemento dispersivo óptico es preferiblemente un prisma óptico.

35 En una segunda realización de la invención, el elemento dispersivo óptico se proporciona en la superficie de la membrana de sensor reflectante de manera que el haz de luz de la fuente luminosa incide sobre el elemento dispersivo óptico. El haz de luz de la fuente luminosa se divide de ese modo por la longitud de onda y se dispersa a medida que se refleja desde la superficie de la membrana de sensor. El haz dispersado resultante adoptará la misma forma que se describió anteriormente en relación con la primera realización de la invención. Cualquier movimiento de la membrana de sensor provocará un movimiento correspondiente del elemento dispersivo óptico y por tanto también un movimiento del haz dispersado de modo que se recibe una parte diferente del haz y por tanto una longitud de onda diferente en el detector de luz.

En la segunda realización, el elemento dispersivo óptico puede adoptar cualquier forma adecuada que puede hacer variar el ángulo al que se refleja el haz de luz incidente, basándose en la longitud de onda. El experto en la técnica conocerá elementos dispersivos ópticos adecuados para su aplicación sobre la membrana de sensor e incluyen, por ejemplo, una rejilla de difracción tal como una rejilla reglada o una rejilla holográfica, o un tipo de filtro óptico.

45 En un ejemplo preferido, el elemento dispersivo óptico está en forma de un filtro que tiene dependencia angular, lo que quiere decir que el espectro de longitud de onda del haz dispersado reflejado de vuelta desde el filtro variará dependiendo del ángulo de incidencia del haz de luz en el filtro. A medida que la membrana de sensor se mueve con respecto a la fuente luminosa, el ángulo de incidencia del haz de luz en el filtro variará, provocando que el espectro de longitud de onda del haz dispersado reflejado varíe. Monitorizando el cambio en la longitud de onda recibida en el detector de luz, es posible entonces monitorizar el cambio en el ángulo de incidencia del haz de luz y por tanto el movimiento de la membrana de sensor. Hay filtros de película delgada adecuados que tienen dependencia angular disponibles de Semrock, Inc.

55 En la segunda realización, el elemento dispersivo óptico puede incorporarse en la superficie de la membrana de sensor de varias maneras, que también conocerá el experto en la técnica. Preferiblemente, el elemento dispersivo óptico está en forma de un recubrimiento o película delgada que se aplica a una zona de la superficie de la membrana de sensor, por ejemplo, usando técnicas tales como fotodeposición o deposición en fase de vapor. Alternativamente, el elemento dispersivo óptico puede integrarse en la membrana de sensor.

En realizaciones según el segundo aspecto de la invención, el elemento dispersivo óptico cubre preferiblemente una

zona definida de la superficie de la membrana de sensor, que coincide con la zona iluminada por el haz de luz de la fuente luminosa. La zona definida puede ser relativamente pequeña en comparación con el área global de la superficie de membrana de sensor, por ejemplo, el elemento dispersivo óptico puede cubrir un área de menos de 5 mm², o menos de 3 mm² o en algunos casos menos de 1 mm².

- 5 En una tercera realización de la invención, el elemento dispersivo óptico se proporciona entre la membrana de sensor y el detector de luz, de manera que el haz de luz no se dispersa hasta después de que se haya reflejado desde la superficie de la membrana de sensor. Cualquier movimiento de la membrana de sensor como resultado de un flujo de aire o vibración provocará un movimiento del haz reflejado de modo que el haz impacta con el elemento dispersivo óptico a un ángulo ligeramente diferente y la posición del haz dispersado producido por el elemento dispersivo óptico cambiará ligeramente. Como con las otras dos realizaciones descritas anteriormente, una parte diferente del haz dispersado se dirigirá entonces al detector de luz. En la tercera realización de la invención, el elemento dispersivo óptico es preferiblemente un prisma óptico.

15 El uso de elementos dispersivos ópticos para dispersar un haz de luz desde una fuente luminosa se conoce bien y el experto en la técnica estará familiarizado con los tipos disponibles de elementos dispersivos ópticos y la manera en la que afectan a un haz de luz. Puede encontrarse algo de información de antecedentes con respecto a elementos dispersivos ópticos, por ejemplo, en "Application of surface-relief diffractive optics to helmet-mounted displays" de C. Cotton, D. Faklis, J. Bowen y G. Morris, *Storming Media* (1991); "RITMOS: a micromirror-based multi-object spectrometer" de R. Meyer, K. Kearney, Z. Ninkov, C. Cotton, P. Hammond y B. Statt, *Proc. SPIE*, 5492 (2004); y "Interference filters and special filters" publicado por Schott AG.

20 El detector de luz del sensor usado en la presente invención está dispuesto para recibir una parte del haz de luz que se refleja desde la superficie de la membrana de sensor y que se ha dispersado a una determinada posición mediante el elemento de dispersión óptico. El intervalo de longitudes de onda o ángulo de luz dispersada recibida por el detector de luz tiene que ser necesariamente menor que el intervalo de longitud de onda o ángulo del haz reflejado total, para permitir que se detecten cambios en la longitud de onda de la luz recibida. El detector de luz está
25 colocado de modo que la parte del haz que se recibe variará según la posición de la membrana de sensor con respecto al detector de luz. El experto en la técnica conocerá tipos de detectores de luz adecuados. Preferiblemente, el detector de luz comprende una o más fibras ópticas y una parte de la luz reflejada se recibe en el extremo de una fibra óptica dirigida a la superficie de la membrana de sensor.

30 En una realización particularmente preferida, el detector de luz comprende un sistema WDM (multiplexado por división de longitud de onda) en el que una parte del haz dispersado se recibe en una única fibra óptica y se dirige como una única entrada a un demultiplexor, que divide el haz de nuevo en dos o más salidas independientes de longitudes de onda diferentes. Cada salida se envía a un diodo PIN y los dos o más diodos PIN se conectan a un amplificador diferencial.

35 A medida que la membrana de sensor se mueve con respecto al detector de luz, la longitud de onda de luz recibida en el detector de luz variará de manera continua y la amplitud de una de las longitudes de onda de salida aumentará mientras que la(s) otra(s) disminuirá(n). Comparando las amplitudes de las diferentes señales de salida, es posible por tanto analizar los cambios en la longitud de onda de la luz recibida y calcular el movimiento correspondiente de la membrana de sensor.

40 Este tipo de disposición de detector de luz es particularmente ventajoso ya que, al contrario que con muchos tipos de micrófonos ópticos convencionales, la salida es relativamente insensible al movimiento en las fibras ópticas, por ejemplo, como resultado de un movimiento de los componentes de turbina eólica. Esto se debe a que cualquier movimiento afectará a cada una de las salidas de longitud de onda de la misma manera de modo que los cambios comunes se anularán mediante el amplificador diferencial y no provocarán grandes imprecisiones.

45 El detector de luz de sensores usado en la presente invención proporciona de manera operativa una salida basándose en cambios en la longitud de onda de la luz recibida. La salida se recibe preferiblemente en un procesador, que procesa los datos de longitud de onda medidos para determinar el patrón de desplazamiento de la membrana de sensor. Basándose en la información acerca del desplazamiento de la membrana de sensor, el procesador puede determinar uno o más parámetros del flujo de aire, o vibración que provocan el desplazamiento de la membrana de sensor. El procesamiento de datos llevado a cabo por el procesador dependerá del funcionamiento
50 del sensor. En determinadas realizaciones, los sensores incorporarán un procesador, por ejemplo, como parte del detector de luz. En otras realizaciones, el procesador no formará parte del propio sensor sino que se conectará al detector de luz en un sistema sensor.

55 La salida del detector de luz o el procesador se recibe en un controlador de la turbina eólica, que controla un parámetro de funcionamiento basándose en la salida detectada. Esto puede ser el control de un parámetro de un componente de turbina eólica, con el fin de maximizar la eficiencia de la turbina eólica. Alternativamente, en determinadas circunstancias, por ejemplo tras la detección de hielo o daño a un componente, el controlador puede provocar que la turbina eólica se apague y deje de funcionar temporalmente de modo que pueda resolverse el problema.

5 La membrana de sensor de los sensores usados en la invención está dispuesta de modo que es sensible a cambios en el flujo de aire que tienen que detectarse por el sensor. Normalmente la membrana será relativamente delgada, preferiblemente de entre 0,5 mm y 2,0 mm, y se tensiona de modo que el flujo de aire probable en la superficie de la membrana de sensor sólo dará como resultado un pequeño movimiento de la superficie de membrana. En la práctica, se ha encontrado que un intervalo de movimiento de la membrana del orden de varios micrómetros es ventajoso, aunque el intervalo de movimiento necesario dependerá de la aplicación.

10 La elección de material de la membrana también dependerá de la aplicación del sensor requerida pero es crítica a la hora de garantizar que la membrana es adecuada para la medición. Un material que es demasiado ligero y flexible será en muchos casos demasiado sensible al flujo de aire y no será adecuado para distinguir entre condiciones de flujo de aire normales y anómalas. Preferiblemente, el material es por tanto suficientemente fuerte y rígido para garantizar que sólo se detecten vibraciones relativamente fuertes (en el intervalo de 10 a 100 Hz). Adicionalmente, la membrana de sensor debe estar formada por un material que tiene una superficie reflectante suficientemente lisa para permitir que el haz de luz se refleje eficazmente de manera que pueda detectarse fácilmente mediante el detector de luz. Preferiblemente, la membrana de sensor está formada por un material polimérico reflectante.

15 En determinadas realizaciones, puede ser posible usar una superficie de un componente de turbina eólica como membrana de sensor para el sensor de la presente invención. Por ejemplo, la superficie exterior de una pala de turbina eólica puede proporcionar una membrana de sensor adecuada para determinadas aplicaciones en las que se desea medir el flujo de aire en la superficie de la pala.

20 En determinadas realizaciones de la presente invención, la fuente luminosa y el detector de luz del sistema sensor óptico se proporcionan de manera operativa en una cavidad de sensor dentro de un componente de pala de turbina eólica, tal como una pala de turbina eólica, y la membrana de sensor cubre al menos parte de la cavidad. La cavidad de sensor puede estar sellada. Esto permite que el entorno de la cavidad se mantenga en niveles de humedad y temperatura que garanticen un buen funcionamiento de la membrana de sensor. Sellar la cavidad también actúa para mantener la superficie interna de la membrana limpia de modo que la reflexión de la luz desde la superficie se mantiene consistente. Además, con la cavidad sellada, puede considerarse que el movimiento de la membrana de sensor es completamente atribuible a variaciones en el flujo de aire en la superficie exterior de la membrana de modo que el sensor puede monitorizar las condiciones de manera precisa. En determinados casos, la cavidad puede llenarse con un gas distinto de aire, tal como un gas inerte, por ejemplo nitrógeno.

25 La presente invención también proporciona una turbina eólica que comprende un sistema sensor óptico que comprende: una pluralidad de sensores ópticos, tal como se describió anteriormente, y un procesador para recibir la salida de los detectores de luz del uno o más sensores ópticos y determinar a partir de la salida el desplazamiento de la membrana de sensor, tal como también se describió anteriormente. Los sistemas usados en la presente invención pueden incluir un único sensor óptico, pero más preferiblemente incluyen una pluralidad de sensores ópticos. Esto permite monitorizar el flujo de aire o vibraciones en varias ubicaciones diferentes en un componente de turbina eólica, proporcionando información para su uso en un sistema sensor más sofisticado.

30 Preferiblemente, los sistemas sensores usados en la presente invención comprenden además una memoria para registrar las salidas de los detectores de luz del uno o más sensores a lo largo de un periodo de tiempo predeterminado, en el que el procesador analiza las salidas registradas con el fin de determinar un estado de la turbina eólica a lo largo del periodo de tiempo. El "estado" puede ser un estado del propio componente, tal como acumulación de hielo o suciedad, o puede ser un estado de las condiciones medioambientales en el componente, tal como el flujo de aire. A continuación se describen ejemplos específicos de los posibles usos de la memoria en relación con los diferentes aspectos de la invención.

35 Los sistemas sensores usados en la presente invención pueden comprender además un alojamiento aislado eléctricamente que contiene al menos la fuente luminosa y el detector de luz. Esto permite que se protejan los componentes del sistema sensor que son vulnerables a descargas eléctricas, por ejemplo de rayos o corrientes de fuga en la maquinaria eléctrica. Los elementos ópticos, no metálicos y mecánicos del sistema sensor pueden instalarse entonces en ubicaciones de la turbina eólica que son sensibles a descargas eléctricas, tales como en el exterior de la turbina eólica, en particular en las palas de turbina eólica, o en la góndola cerca de los componentes eléctricos tales como el generador.

40 El sistema sensor descrito tiene varias aplicaciones posibles en turbinas eólicas según la invención. En un primer aspecto de la invención, el sistema sensor está adaptado para su uso en la monitorización del flujo de aire en una superficie de un componente de turbina eólica, en el que la membrana de sensor está montada de manera operativa en una superficie de un componente de turbina eólica para monitorizar el flujo de aire a lo largo de la superficie y en el que el procesador determina, a partir de la salida del detector de luz, el tipo de flujo de aire a lo largo de la membrana de sensor. En particular, los sistemas sensores de turbinas eólicas según el primer aspecto de la invención pueden adaptarse para detectar de manera operativa un flujo de aire turbulento en la superficie de un componente de turbina eólica, en los que el procesador analiza variaciones en la longitud de onda de la luz recibida en el detector de luz a lo largo de un periodo de tiempo predeterminado para determinar si el flujo de aire a lo largo de la membrana de sensor es turbulento.

Los sistemas sensores de turbinas eólicas según el primer aspecto de la invención encuentran aplicación particular en la monitorización de las condiciones de flujo de aire en la superficie de una pala de turbina eólica y en la detección de un flujo de aire turbulento a lo largo de la superficie de pala.

5 En determinadas realizaciones, puede monitorizarse el flujo de aire en la superficie de pala con el fin de monitorizar indirectamente el estado de superficie de la pala. Los cambios en el estado de la pala, tales como el deterioro de la superficie de pala, por ejemplo debido a la erosión o corrosión, o acumulación de materia tal como suciedad o hielo, 10 afectarán enormemente al flujo de aire a lo largo de la superficie de pala. La acumulación de suciedad, por ejemplo, puede manifestarse como un aumento gradual en la turbulencia detectada en la superficie. La acumulación de hielo puede tener el mismo efecto en cuanto a aumentar la turbulencia pero el efecto se observará más rápidamente a lo largo de varias horas. Por tanto, la naturaleza de la materia que se acumula en la pala también puede deducirse a partir de la salida de los sensores. Preferiblemente, tales sistemas para monitorizar el estado de la superficie de pala incluyen una pluralidad de sensores ópticos en el lado de barlovento y sotavento de la pala, de modo que se obtiene una vista de sensor completa.

15 Preferiblemente se incorporan sistemas sensores similares en cada una de las palas de una turbina eólica. Si se desea, los diferentes sistemas de las palas pueden conectarse a un procesador común. Esto permite que el procesador compare la salida de los diferentes sensores ópticos de una pala con los de otra. El procesador puede proporcionar entonces una indicación de si las palas están montadas y funcionan correctamente, y puede comparar el estado de las diferentes palas.

20 Preferiblemente, en sistemas sensores de turbinas eólicas según el primer aspecto de la invención para monitorizar el estado de la superficie de pala, los sensores ópticos se proporcionan cada uno en un alojamiento de sensor que tiene paredes que definen una cavidad, en la que están contenidos la fuente luminosa y el detector de luz. El sensor se monta entonces en la pala de manera que la membrana de sensor separa la cavidad del aire exterior, y de manera que la membrana está en contacto con el flujo de aire a lo largo de la superficie de la pala.

25 Preferiblemente, la membrana de sensor y la superficie de pala están dispuestas de modo que forman una superficie de pala uniformemente continua. Esto garantiza que la presencia de la membrana de sensor no tiene un impacto sobre las propiedades aerodinámicas de la pala y también evita la introducción de obstrucciones en la superficie de pala que pueden afectar a los patrones de flujo de aire. Si se desea, la membrana puede pintarse del mismo color que la superficie de componente circundante para garantizar que el aspecto visual de la turbina eólica no se ve perjudicado.

30 En algunos estados de funcionamiento, el flujo de aire a lo largo de la superficie de la pala será laminar, dando como resultado poca o ninguna perturbación de la membrana de sensor. El flujo de aire turbulento provocado, por ejemplo, por el bloqueo o la acumulación de materia en la superficie de pala, dará como resultado un movimiento de la membrana repentino e impredecible y cambios asociados en la longitud de onda de la luz reflejada de vuelta al detector de luz.

35 El procesador puede tomar lecturas continuas o periódicas de cada uno de la pluralidad de sensores ópticos que pueden registrarse en la memoria para desarrollar un registro de tiempos de cambios en el flujo de aire a lo largo de la pala. El procesador puede determinar un estado de la superficie de pala basándose en un cambio en las salidas de sensor en comparación con salidas pasadas. Esto permite que las salidas pasadas actúen como referencia para la comparación con las lecturas actuales o instantáneas que están tomándose. Esta información comparativa puede usarse para determinar cambios a gran escala en el flujo de aire que son indicativos de problemas con el componente. Alternativamente o además, la información de los sensores ópticos puede usarse para monitorizar el rendimiento de una pala de turbina eólica para permitir la mejora y el desarrollo continuos de propiedades aerodinámicas de palas de turbina eólica, tales como la forma de pala.

45 En un segundo aspecto de la invención, el sistema sensor está adaptado para su uso en un sistema de control de pala. El sistema de control de pala comprende un sistema sensor tal como se describió anteriormente en relación con el primer aspecto de la invención para detectar turbulencia en la superficie de la pala, y un controlador para recibir datos del procesador del sistema sensor y, basándose en la detección del estado del flujo de aire, controlar un parámetro aerodinámico de la pala de rotor.

50 Los sistemas de turbinas eólicas según el segundo aspecto de la invención permiten que la interacción aerodinámica de la pala con el flujo de aire se monitorice en tiempo real, y que la pala se ajuste según se desee basándose en una medida de turbulencia.

55 En determinadas realizaciones preferidas de turbinas eólicas según el segundo aspecto de la invención, el parámetro aerodinámico para el control es el ángulo de paso de la pala de turbina eólica. El controlador controla preferiblemente el paso de las palas para minimizar la turbulencia en la superficie de pala y maximizar la potencia de salida de la turbina eólica. Esto ofrece un mecanismo de control de paso de pala de rotor sensible y ajustado finamente basándose en las condiciones aerodinámicas inmediatas de la pala de turbina eólica.

Tal como se describió anteriormente en relación con el primer aspecto de la invención, en condiciones de funcionamiento normal de la turbina eólica, el flujo de aire a lo largo de la superficie de pala será laminar, dando

como resultado poca o ninguna perturbación de la membrana de sensor. El flujo de aire turbulento provocado por el paso de la pala que induce estados de tipo bloqueo dará como resultado un movimiento de la membrana repentino e impredecible y cambios asociados en la longitud de onda de la luz detectada.

5 Para detectar estados de tipo bloqueo, en las que el ángulo de paso de la pala es demasiado grande, los sensores ópticos están ubicados preferiblemente en mayores números en la superficie de succión de la pala y más preferiblemente en mayores números hacia el borde de salida del lado de succión de la pala, que en otras zonas.

10 En realizaciones alternativas, el parámetro aerodinámico para el control es la forma de pala, o el flujo de aire más allá de la pala. La provisión de mecanismos adecuados para cambiar dinámicamente la forma de pala o ajustar el flujo de aire más allá de la pala puede hacerse funcionar entonces basándose en las condiciones detectadas para garantizar que las condiciones de funcionamiento se mantienen según valores o intervalos deseados preestablecidos, cuando sea posible. Las técnicas conocidas para ajustar dinámicamente la forma de la pala incluyen, por ejemplo, aletas articuladas, microaletas, aletas con ranuras o ranuras de superficie, resaltos superficiales cóncavos o convexos, y cavidades o huecos llenos de fluido en el interior de la pala.

15 En un tercer aspecto de la invención, el sistema sensor está adaptado para funcionar como un sistema sensor de vibración para monitorizar el nivel de vibración de componentes de turbina eólica con el fin de detectar estados de funcionamiento anómalo. Por ejemplo, en determinadas realizaciones preferidas, el sistema sensor puede estar adaptado para sustituir a los acelerómetros usados actualmente para monitorizar la salud de los componentes dentro de la góndola, tales como el generador, monitorizando las vibraciones en la superficie de los componentes.
20 En el caso de un generador, cuando se está desarrollando o se ha desarrollado un fallo, se ha encontrado que el generador tiene una frecuencia de vibración diferente de la frecuencia durante el funcionamiento normal. Detectando y analizando la vibración en la superficie del generador pueden identificarse problemas que perjudicarán al funcionamiento antes de producirse una avería.

25 El sistema sensor es particularmente adecuado para su aplicación en un sistema de monitorización de estado para componentes de la turbina eólica dentro de la góndola, tales como el generador o la caja de engranajes, ya que el sistema está formado en su mayoría por elementos ópticos que no se ven afectados por los campos eléctricos o magnéticos producidos por la maquinaria pesada dentro de la góndola.

30 En otras realizaciones, un sistema sensor de vibración tal como se usa en turbinas eólicas según el tercer aspecto de la presente invención puede usarse para monitorizar los niveles de vibración en un componente de turbina eólica, tal como una pala o torre de turbina eólica, debido a la carga de viento durante el funcionamiento. Niveles de vibración excesivos pueden reducir la vida útil de los componentes de turbina eólica y, en algunos casos, provocar daño a los componentes. Por tanto, es importante monitorizar los niveles de vibración de modo que los parámetros de funcionamiento de la turbina eólica puedan controlarse en respuesta a la detección de niveles de vibración por encima de un valor umbral. Por ejemplo, el ángulo de paso de las palas de turbina eólica puede controlarse con el fin de reducir la vibración, o la turbina eólica puede apagarse temporalmente. Además, el sistema sensor de vibración
35 puede usarse para detectar cambios en la frecuencia resonante de la pala de turbina eólica, lo que proporcionará una indicación de que la pala se ha dañado, o está cubierta con hielo u otra materia.

40 En un cuarto aspecto de la invención, relacionado con el tercer aspecto descrito anteriormente, el sistema sensor se usa como un micrófono para monitorizar el sonido emitido desde componentes de turbina eólica con el fin de detectar estados de funcionamiento anómalo. Por ejemplo, en determinadas realizaciones preferidas, el sistema sensor puede estar adaptado para sustituir a los micrófonos utilizados actualmente para monitorizar la salud de componentes dentro de la góndola, tales como el generador, monitorizando el sonido u ondas acústicas emitidos desde los componentes. En el caso de un generador, cuando se está desarrollando o se ha desarrollado un fallo, se ha encontrado que el generador emite un sonido diferente del sonido emitido durante el funcionamiento normal. En un caso sencillo, un sonido particular puede indicar que un cojinete está dañado. Detectando y analizando el espectro de sonido del generador, pueden identificarse problemas que perjudicarán al funcionamiento antes de producirse una avería.

45 De manera similar, el sistema sensor puede usarse como un micrófono para monitorizar ruido o sonido de otros componentes de turbina eólica, incluyendo por ejemplo la caja de engranajes, un cojinete tal como un cojinete principal o un cojinete de pala, un engranaje tal como un engranaje de guiñada, o una pala. El sistema sensor puede adaptarse según la frecuencia del sonido que debe monitorizarse, por ejemplo, mediante la selección del tipo de material usado para formar la membrana de sensor, la tensión de la membrana de sensor y/o el tipo de elemento dispersivo óptico.

50 La frecuencia y/o amplitud del sonido generado por el componente de turbina eólica puede monitorizarse directamente mediante la monitorización de la frecuencia y amplitud del movimiento de la membrana de sensor en el sistema sensor. Para cualquier componente particular, se conocerá la frecuencia o amplitud asociada con un determinado tipo de daño o fallo y cualquier cambio de la frecuencia o amplitud del sonido generado por el componente desde los niveles normales hacia los niveles indicativos de daño puede identificarse inmediatamente. Entonces puede tomarse la acción necesaria para evitar o reducir un daño adicional o para sustituir o reparar el componente.

5 En el tercer y cuarto aspectos de la invención, el uso de un sistema sensor que comprende un tipo de micrófono óptico, sin componentes electrónicos, es particularmente ventajoso dado que el sistema sensor no es sensible a perturbación EMC. Además, dado que el sistema sensor no requiere el uso de componentes eléctricamente conductores, puede instalarse de manera segura en una pala de turbina eólica sin aumentar el riesgo de daño a la pala por impactos de rayos.

Las turbinas eólicas según la invención pueden comprender uno o más sistemas sensores, tal como se describió anteriormente. Pueden usarse diferentes sistemas sensores para monitorizar diferentes componentes de turbina eólica y/o diferentes estados.

10 En una realización preferida de una turbina eólica según la invención, un sistema sensor está montado de manera operativa en cada pala de turbina eólica de manera que la membrana de sensor es solidaria con la superficie de la pala. Un sistema de este tipo puede estar adaptado para monitorizar turbulencias o vibraciones, tal como se describió anteriormente.

15 La presente invención proporciona además un sistema sensor óptico que comprende uno o más sensores, comprendiendo cada sensor: una membrana de sensor reflectante; una fuente luminosa para iluminar una superficie de la membrana de sensor; un elemento dispersivo óptico dispuesto para dispersar el haz de luz desde la fuente luminosa para producir un haz de luz dispersado; y un detector de luz para recibir una parte del haz de luz tras la reflexión del haz de luz de la superficie de la membrana de sensor y tras la dispersión del haz de luz por el elemento dispersivo óptico, en el que la longitud de onda de la luz recibida en el detector de luz varía en función del desplazamiento de la membrana de sensor y en el que el detector de luz proporciona de manera operativa una salida basándose en cambios en la longitud de onda de la luz recibida. Tal como se describió anteriormente, el elemento dispersivo óptico puede colocarse entre la fuente luminosa y la membrana de sensor, en la propia membrana de sensor, o entre la membrana de sensor y el detector de luz.

Ahora se describirá adicionalmente la invención únicamente a modo y con referencia a las figuras adjuntas en las que:

25 la figura 1 ilustra una turbina eólica;

la figura 2 es un alzado longitudinal de una pala de turbina eólica de la turbina de la figura 1, que muestra una disposición de ejemplo de sensores ópticos en un sistema sensor de turbulencia;

la figura 3 ilustra un ejemplo de un sistema sensor óptico de una turbina eólica según la primera realización descrita anteriormente;

30 la figura 4 proporciona una ilustración esquemática del funcionamiento del sensor óptico de la figura 3 para detectar el movimiento de la membrana de sensor;

la figura 5 ilustra un ejemplo de un sensor óptico de una turbina eólica según la segunda realización descrita anteriormente;

35 la figura 6 ilustra un ejemplo de un sensor óptico de una turbina eólica según la tercera realización descrita anteriormente; y

la figura 7 ilustra el uso del sistema sensor óptico según la invención durante la monitorización de un generador de turbina eólica.

40 La figura 1 ilustra una turbina eólica 1 según la invención que comprende una torre de turbina eólica 2 en la que está montada una góndola de turbina eólica 3. Un rotor de turbina eólica 4 que comprende tres palas de turbina eólica 5 está montado en un buje 6. El buje 6 está conectado a la góndola 3 mediante un árbol de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde la parte frontal de la góndola. La turbina eólica de la figura 1 puede ser un modelo pequeño previsto para el uso de servicio de luz o doméstico, o puede ser un modelo grande tal como aquellos que son adecuados para su uso en la generación de electricidad a gran escala en un parque eólico. En este último caso, el diámetro del rotor puede ser de hasta 100 metros o más.

45 Cada pala de turbina eólica 5 incorpora un sistema sensor 10 que comprende una pluralidad de sensores de turbulencia 12 separados a lo largo de la pala, tal como se ilustra en la figura 2 que muestra una vista del lado de sotavento de la pala 5. Los sensores de turbulencia 12, tal como se describe en más detalle a continuación, están dispuestos a lo largo de la superficie de la pala 5 en una pluralidad de ubicaciones. Aunque es posible en algunas realizaciones que los sensores se proporcionen en ubicaciones separadas uniformemente a lo largo de la superficie de pala, en la práctica es suficiente si están dispuestos para proporcionar al menos algo de cobertura en las direcciones longitudinal y lateral de la pala. En el ejemplo mostrado en la figura 2, los sensores están previstos en una serie lineal dispuesta a lo largo de la longitud de la pala y en varias series lineales laterales separadas a lo largo de la longitud de la pala y que se extienden a lo largo de la pala de manera que se proporcionan sensores tanto en el lado de barlovento como en el de sotavento.

En la figura 2 los sensores se muestran como que están separados generalmente de manera uniforme, ya que esto permitirá recopilar datos acerca del flujo de aire alrededor de toda la superficie de pala. Sin embargo, se apreciará que para detectar estados de tipo bloqueo, la zona de mayor interés es el lado de salida de sotavento de la pala y por tanto pueden montarse más sensores en esta región.

5 La figura 3 ilustra uno de los sensores 12 que constituyen el sistema sensor 10 mostrado en la figura 2, en la que el sensor se muestra *in situ* integrado en una de las palas 5 de la turbina eólica 1. Cada sensor 12 comprende un alojamiento de sensor 14 que define una cavidad 16 que contiene el aparato sensor. Una superficie del alojamiento de sensor está dotada de una membrana de sensor 18 que está montada en la superficie de pala de modo que la membrana 18 separa la cavidad 16 del aire exterior y de modo que la membrana 18 está en contacto con el flujo de
10 aire en la superficie de la pala 5. La cavidad está aislada completamente del entorno exterior por las paredes del alojamiento de sensor 14 y la membrana de sensor 18. La cavidad 16 puede llenarse con un gas inerte si se desea.

La membrana de sensor 18 está dispuesta de modo que forma una superficie uniformemente continua con la superficie exterior de la pala 5. La membrana 18 también está dispuesta de manera que es sensible a cambios en el flujo de aire en la superficie de la pala de turbina eólica. El grosor de la membrana de sensor 18 está entre 0,5 y
15 2 mm y la membrana está tensionada de modo que un flujo de aire turbulento en la superficie de pala sólo dará como resultado pequeños movimientos de la membrana de sensor 18.

El sensor 12 comprende además una fuente luminosa 20 orientada a la membrana 18 de modo que la luz incide en la superficie interior de la membrana de sensor a un ángulo agudo con respecto a la superficie, por ejemplo, a un ángulo de aproximadamente 45 grados. La fuente luminosa 20 comprende un diodo emisor de luz 22 proporcionado
20 en el exterior del alojamiento de sensor 14, conectado a una fibra óptica 24 que está montada dentro del alojamiento de sensor 14 de modo que la luz emitida desde el extremo expuesto de la fibra óptica 24 se dirige hacia la membrana de sensor 18. El diodo emisor de luz 22 emite un único haz de luz 28a que tiene un intervalo de longitudes de onda de entre aproximadamente 1500 nm y 1505 nm.

Un elemento prismático 26 está montado delante del extremo de la fibra óptica 24 de manera que el haz de luz 28a de la fibra óptica 24 pasa a través del elemento prismático 26 y se divide por el elemento prismático 26 para formar un haz dispersado 28b con un ángulo de dispersión α en el que longitudes de onda diferentes del haz de luz 28a se refractan por ángulos ligeramente diferentes. Como resultado, cada longitud de onda diferente de luz incide en una posición ligeramente diferente en la superficie interna de la membrana de sensor 18. Una línea discontinua indica la parte del haz dispersado, que impacta en el detector de luz con la mayor intensidad y la longitud de onda en esta
25 situación es indicativa del estado nulo o no desplazado de la membrana.

Se apreciará que la ilustración en la figura 3 es esquemática y no está dibujada a escala. En realidad, el elemento prismático 26 puede alcanzar una dispersión óptica de entre 50 y 100 nm por grado de ángulo de modo que el ángulo de dispersión α del haz dispersado 28b será significativamente más pequeño que el ilustrado esquemáticamente en la figura 3.

35 El sensor 12 comprende además un detector de luz 30 que está colocado dentro del alojamiento de sensor 14 para recibir luz que se refleja de vuelta desde la membrana de sensor 18. El detector de luz 30 comprende una fibra óptica 32 montada de manera que una parte del haz reflejado se dirige al extremo expuesto de la fibra 32. El extremo opuesto de la fibra óptica 32 está conectado a un procesador (no mostrado) alejado del alojamiento de sensor 14. La luz recibida se transmite por la fibra óptica 32 al procesador, en el que la luz recibida se divide en señales de longitud de onda diferente mediante un sistema WDM y los haces de longitud de onda diferente se envían cada uno a un diodo PIN que detecta la intensidad o amplitud del haz y emite una señal a un amplificador diferencial. El procesador analiza las amplitudes usando una técnica de procesamiento matemático adecuado y detecta cambios en la amplitud de los haces de longitud de onda diferente que son indicativos de un cambio en la posición de la membrana de sensor. El procesador incluye una memoria que se usa para almacenar los patrones
40 registrados de variación de amplitud o de intensidad.

Tal como se muestra en la figura 3 y tal como se describió anteriormente, la luz que incide sobre la superficie de membrana de sensor está en forma de un haz de luz dispersado 28b de modo que cada longitud de onda de luz incide en la superficie a un ángulo ligeramente diferente. Por tanto, cada longitud de onda de luz también se refleja alejándose de la superficie de membrana de sensor a un ángulo ligeramente diferente y el haz reflejado 28c también
45 se dispersará. La fibra óptica 32 del detector de luz está montada de manera que sólo recibe una parte del haz de luz reflejado, dispersado, correspondiente a un subintervalo del intervalo total de longitudes de onda dentro del haz dispersado 28c. En la posición en reposo de la membrana de sensor 18, la luz recibida está a una longitud de onda promedio λ_1 .

Tal como puede determinarse fácilmente a partir de la figura 3, tras el movimiento de la membrana como resultado de flujo de aire en la superficie de pala o vibración, la superficie interna de la membrana de sensor 18 se mueve acercándose o alejándose del detector de luz 30 lo que a su vez provoca un ligero cambio en la posición del haz reflejado 28c con respecto al detector de luz. En particular, se desvía el ángulo entre la superficie de membrana de sensor de zona sobre la que incide el haz de luz 28b y el detector de luz 30. En la figura 4 se ilustra un ejemplo simplificado en el que la membrana de sensor se mueve hacia arriba con respecto a la superficie de pala una

distancia d (la posición de la membrana de sensor desplazada se muestra en líneas discontinuas).

5 Puede observarse que, como resultado del desplazamiento de la membrana de sensor, una parte diferente del haz reflejado, dispersado 28c incide sobre el extremo de la fibra óptica 32 del detector de luz 30. A medida que la membrana de sensor se mueve desde su posición original hasta la posición desplazada mostrada, la intensidad de la luz recibida a una primera longitud de onda λ_1 correspondiente a la posición en reposo de la membrana de sensor disminuirá en consecuencia, mientras que la intensidad de la luz recibida a una segunda longitud de onda λ_2 aumentará.

10 El procesador detecta cambios en la intensidad de la longitud de onda de la luz recibida y a partir de esto puede calcular la distancia d que se ha movido la membrana de sensor, en función del tiempo t. Al grabar el patrón del desplazamiento de la membrana de sensor, es posible detectar, por ejemplo, cuando el flujo de aire en la superficie de pala cambia de un flujo laminar a un flujo turbulento. El procesador envía una señal a un controlador que puede controlar uno o más parámetros de funcionamiento de la turbina eólica, tales como el paso de la palas de turbina eólica, basándose en la turbulencia detectada. En determinados casos en los que la turbulencia indica una acumulación de suciedad o hielo en la pala, el controlador puede apagar temporalmente la turbina para permitir reparar o reacondicionar las palas, o para impedir un daño adicional a las palas. A continuación, con referencia a la figura 4, se expone un ejemplo sencillo de cómo el desplazamiento d de la membrana de sensor está relacionado con el cambio en la longitud de onda de la luz recibida.

20 En la figura 4 sólo se muestran los haces de luz de longitudes de onda λ_1 y λ_2 que se reciben en el detector de luz, por motivos de simplicidad. Para el haz de luz de longitud de onda λ_1 , mostrado en una línea discontinua, recibido en el detector de luz cuando la membrana de sensor está en una posición en reposo, la distancia vertical y desde el elemento prismático 26 hasta la membrana 18 es igual a la distancia horizontal x entre el elemento prismático 26 y el punto en la membrana 18 en el que el haz impacta con la superficie. Esto significa que la luz de longitud de onda λ_1 impacta con la superficie de la membrana de sensor 18 a un ángulo β de 45 grados.

25 Cuando la membrana de sensor se mueve hacia arriba una distancia d con respecto a la posición en reposo, la distancia vertical desde el elemento prismático 26 hasta la membrana 18 aumentará hasta (y+d). El haz de luz de longitud de onda λ_2 que se recibe con alta intensidad en el detector de luz tras este movimiento impacta con la superficie de la membrana de sensor a un ángulo β' en donde:

$$\tan \beta' = \frac{y+d}{y}$$

30 Una vez determinado el ángulo β' , el cambio en la longitud de onda de la luz puede calcularse basándose en el cambio en el ángulo ($\beta' - \beta$) multiplicado por la dispersión óptica por ángulo del haz. Por ejemplo, cuando la membrana se mueve hacia arriba d = 1 micrómetro e y = 1 mm, puede calcularse que el cambio en el ángulo ($\beta' - \beta$) es de 0,029 grados. Para una dispersión óptica de 100 nm por grado de ángulo, esto corresponde a un cambio en la longitud de onda ($\lambda_2 - \lambda_1$) de 2,9 nm. La relación entre el movimiento de la membrana y el cambio en la longitud de onda detectada para la disposición particular es por tanto de 2,9 nm por micrómetro de movimiento. Por tanto, un cambio en la longitud de onda detectada de 1 pm (picómetro) representa un movimiento de 345 pm.

Por analogía, pueden llevarse a cabo fácilmente cálculos similares para otras disposiciones del detector de luz y la fuente luminosa.

40 O simplemente, en cuanto λ_1 cambia a una longitud de onda diferente, se detecta desplazamiento de la membrana. La necesidad de cuantificar el desplazamiento puede servir para determinar la gravedad de la turbulencia o el daño a la pala, o distinguir entre diferentes estados de influencia externa sobre la membrana, o simplemente para determinar si se ha alcanzado un determinado umbral. La figura 5 muestra un sensor 112 que tiene una disposición similar a la mostrada en la figura 3 y descrita anteriormente, excepto porque en lugar del elemento prismático 26 en la figura 3, se proporciona una rejilla de difracción 126 en una zona definida en la superficie de la membrana de sensor 118. El haz de luz 128a de la fuente luminosa 20 incide sobre la rejilla de difracción 126 en la superficie de la membrana de sensor 118. Dado que el haz de luz impacta con la rejilla de difracción 126, se reflejará de vuelta desde la rejilla mientras que al mismo tiempo se dividirá para formar un haz dispersado 128b con un ángulo de dispersión α en el que longitudes de onda diferentes del haz de luz se refractan mediante ángulos ligeramente diferentes. Como resultado, cada longitud de onda diferente de luz se refleja desde la membrana de sensor 118 en una dirección ligeramente diferente hacia el detector de luz 30.

50 A medida que la membrana de sensor se mueve acercándose o alejándose del detector de luz 30, la posición a la que impacta el haz de luz 128a con la rejilla de difracción 126 cambiará ligeramente y habrá un cambio correspondiente en la posición del haz dispersado reflejado 128b con respecto al detector de luz 30. Dado que la posición del detector de luz 30 es fija, la longitud de onda de la luz que alcanza el detector de luz 30 dependerá de la posición de la membrana de sensor 118.

55 En la figura 5 se ilustra un ejemplo simplificado en el que la membrana de sensor 118 se mueve hacia arriba con

respecto a la superficie de pala una distancia d (la posición de la membrana de sensor desplazada se muestra en líneas discontinuas).

Puede observarse que, como resultado del desplazamiento de la membrana de sensor, una parte diferente del haz reflejado, dispersado 128b incide sobre el extremo de la fibra óptica 32 del detector de luz 30. A medida que la membrana de sensor 118 se mueve desde su posición original hasta la posición desplazada mostrada, la intensidad de la luz recibida a una primera longitud de onda λ_1 (línea continua) correspondiente a la posición en reposo de la membrana de sensor disminuirá en consecuencia mientras que la intensidad de la luz recibida a una segunda longitud de onda λ_2 (línea discontinua) aumentará. Tal como se describió anteriormente en relación con la figura 4, este cambio en la longitud de onda de la luz detectada puede usarse para calcular el movimiento de la membrana.

La figura 6 muestra un sensor 212 que tiene una disposición similar a la mostrada en la figura 3 y descrita anteriormente, excepto porque en lugar del elemento prismático 26 en la figura 3, se proporciona un elemento prismático 226 entre la membrana de sensor 218 y el detector de luz 30. El haz de luz no dispersado 228a de la fuente luminosa 20 incide sobre la superficie de la membrana de sensor 218 y se refleja por la membrana de sensor 218 en un haz reflejado no dispersado 228b. Entonces el haz de luz reflejado 228b pasa a través del elemento prismático 226 y se divide por el elemento prismático 226 para formar un haz dispersado 228c con un ángulo de dispersión α en el que longitudes de onda diferentes del haz de luz 28a se refractan mediante ángulos ligeramente diferentes. Una línea discontinua indica la parte del haz dispersado que impacta con la mayor intensidad con el detector de luz y la longitud de onda en esa situación es indicativa del estado nulo o no desplazado de la membrana.

A medida que la membrana de sensor 218 se mueve acercándose o alejándose de la fuente luminosa 20, la posición y/o el ángulo al que impacta el haz de luz reflejado 228b con el elemento prismático 226 cambiará ligeramente y habrá un cambio correspondiente en el ángulo y la posición del haz dispersado 228c con respecto al detector de luz 30. Dado que la posición del detector de luz 30 es fija, la longitud de onda de la luz que alcanza el detector de luz 30 dependerá de la posición de la membrana de sensor 218. Por ejemplo, a medida que la membrana de sensor 228 se mueve alejándose de la fuente luminosa 20, la intensidad de la luz recibida a una primera longitud de onda λ_1 aumentará mientras que la intensidad de la luz recibida a una segunda longitud de onda λ_2 disminuirá. Se producirá lo contrario a medida que la membrana de sensor 228 se mueve acercándose a la fuente luminosa 20. Tal como se describió anteriormente en relación con la figura 4, este cambio en la longitud de onda de la luz detectada puede usarse para calcular el movimiento de la membrana usando métodos trigonométricos sencillos.

La figura 7 ilustra esquemáticamente el uso de un sensor tal como se describió anteriormente en la monitorización del sonido generado por una caja de engranajes de turbina eólica. Esta disposición es según el cuarto aspecto de la presente invención, tal como se describió anteriormente. La figura 7 muestra esquemáticamente los componentes dentro de la góndola de turbina eólica, incluyendo un árbol principal 310, que está acoplado a un generador 312 a través de una caja de engranajes 314. Un micrófono óptico 316 que comprende un sensor tal como se describió anteriormente está montado en una parte de la cubierta interna de la góndola, a una distancia alejada de la superficie de la caja de engranajes 314. El micrófono óptico 316 está montado de manera que la membrana de sensor del sensor recibe ondas acústicas generadas por la caja de engranajes 314 durante el funcionamiento de la turbina. Tal como se muestra, el micrófono óptico 316 está conectado a una disposición de fibras ópticas 318 que proporcionan la fuente luminosa y el detector de luz del sensor.

Las ondas acústicas generadas por la caja de engranajes 314 durante el funcionamiento provocan la vibración de la membrana de sensor del sensor en el micrófono óptico. Al monitorizar el movimiento de la membrana de sensor a lo largo del tiempo, usando las técnicas de longitud de onda descritas anteriormente, es posible determinar la frecuencia y amplitud del sonido detectado. La frecuencia y amplitud del sonido se monitorizan a lo largo del tiempo de modo que puede identificarse inmediatamente cualquier cambio en el perfil de sonido que pueda ser indicativo de daño o fallo de la caja de engranajes 314 o un componente de la misma. En el caso de que se identifique tal daño o fallo, la turbina eólica puede apagarse para permitir llevar a cabo el mantenimiento necesario en la caja de engranajes 314.

REIVINDICACIONES

1. Turbina eólica que incluye un sistema sensor óptico que comprende uno o más sensores, comprendiendo cada sensor:
 - una membrana de sensor reflectante;
- 5 una fuente luminosa para iluminar una superficie de la membrana de sensor con un haz de luz;
 - caracterizada porque cada sensor comprende además:
 - un elemento dispersivo óptico dispuesto para dispersar el haz de luz de la fuente luminosa para producir un haz de luz dispersado; y
- 10 un detector de luz para recibir una parte del haz de luz tras la reflexión del haz de luz de la superficie de la membrana de sensor y tras la dispersión del haz de luz por el elemento dispersivo óptico, en la que la longitud de onda de la luz recibida en el detector de luz varía en función del desplazamiento de la membrana de sensor y en la que el detector de luz proporciona de manera operativa una salida basándose en cambios en la longitud de onda de la luz recibida,
 - en la que la turbina eólica comprende además un controlador para recibir datos del sistema sensor y, basándose en los datos recibidos, controlar un parámetro de funcionamiento de la turbina eólica.
- 15 2. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que el elemento dispersivo óptico se proporciona entre la fuente luminosa y la membrana de sensor de tal manera que la superficie de la membrana de sensor se ilumina con el haz de luz dispersado.
3. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que el elemento dispersivo óptico se proporciona en la superficie de la membrana de sensor de manera que un haz de luz dispersado se refleja desde la superficie.
- 20 4. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que el elemento dispersivo óptico se proporciona entre la membrana de sensor y el detector de luz de manera que se dispersa el haz de luz reflejado.
5. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la fuente luminosa emite un haz de luz con un intervalo de longitud de onda de menos de 10 nm.
- 25 6. Turbina eólica según la reivindicación 5, en la que la fuente luminosa emite un haz de luz con un intervalo de longitud de onda de 1500 nm a 1505 nm.
7. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que el elemento dispersivo óptico del sensor es un prisma o una rejilla de difracción para separar las longitudes de onda de la luz en el haz de luz para proporcionar el haz de luz dispersado.
- 30 8. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que el elemento dispersivo óptico del sensor es una rejilla de difracción, rejilla holográfica o filtro dependiente de ángulo.
9. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la fuente luminosa del sensor es un diodo emisor de luz.
- 35 10. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que el detector de luz del sensor comprende una o más fibras ópticas.
11. Turbina eólica según la reivindicación 10, en la que el detector de luz comprende un sistema de WDM (multiplexado por división de longitud de onda) para dividir la luz recibida según la longitud de onda.
- 40 12. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la fuente luminosa y el detector de luz del sistema sensor óptico se proporcionan de manera operativa en una cavidad de sensor dentro de un componente de pala de turbina eólica y en la que la membrana de sensor cubre al menos parte de la cavidad.
13. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que el sistema sensor óptico comprende una pluralidad de sensores ópticos; y un procesador para recibir la salida de los detectores de luz de la pluralidad de sensores ópticos y determinar a partir de la salida el desplazamiento de la membrana de sensor dependiente de la intensidad y longitud de onda de luz recibida en un detector de luz.
- 45 14. Turbina eólica según la reivindicación 13, en la que el sistema sensor óptico comprende además una memoria para registrar las salidas de los detectores de luz de la pluralidad de sensores ópticos durante un periodo de tiempo predeterminado en la que el procesador analiza las salidas registradas con el fin de determinar un estado de la turbina eólica a lo largo del periodo de tiempo.
- 50

15. Turbina eólica según la reivindicación 13 ó 14, que comprende además un controlador para recibir datos del procesador y, basándose en los datos recibidos, controlar un parámetro aerodinámico de la turbina eólica.
- 5 16. Turbina eólica según la reivindicación 13, 14 ó 15, en la que el sistema sensor óptico está adaptado para monitorizar de manera operativa el flujo de aire en una superficie de un componente de turbina eólica, en la que la membrana de sensor está montada de manera operativa en una superficie de un componente de turbina eólica para monitorizar flujo de aire a lo largo de la superficie, en la que el procesador determina a partir de la salida de los detectores de luz el tipo de flujo de aire a lo largo de la membrana de sensor.
- 10 17. Turbina eólica según la reivindicación 16, en la que el sistema sensor óptico está adaptado para detectar de manera operativa un flujo de aire turbulento en la superficie del componente de turbina eólica, en la que el procesador analiza variaciones en la longitud de onda de la luz recibida en los detectores de luz a lo largo de un periodo de tiempo predeterminado para determinar si el flujo de aire sobre la membrana de sensor es turbulento.
- 15 18. Turbina eólica según la reivindicación 17, en la que el sistema sensor óptico forma parte de un sistema de control de pala y en la que el controlador recibe de manera operativa datos del procesador del sistema sensor y, basándose en la detección de un flujo de aire turbulento, controla un parámetro aerodinámico de la pala.
19. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, en la que el sistema sensor óptico está montado en la superficie de un componente de turbina eólica y está adaptado para detectar de manera operativa la vibración del componente de turbina eólica.
- 20 20. Turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, en la que el sistema sensor óptico está adaptado para proporcionar un micrófono óptico para monitorizar de manera operativa el sonido generado por un componente de turbina eólica de manera que el micrófono óptico se ajusta para detectar ondas acústicas dentro de un intervalo de frecuencia definido, en la que el intervalo de frecuencia definido varía según el tipo de componente de turbina eólica que va a monitorizarse.
- 25 21. Turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que el sistema sensor óptico está montado de manera operativa sobre una pala de turbina eólica de manera que la membrana de sensor es solidaria con la superficie de la pala.
- 30 22. Sistema sensor óptico para una turbina eólica, teniendo el sistema sensor uno o más sensores ópticos, comprendiendo cada sensor:
una membrana de sensor reflectante;
una fuente luminosa para iluminar una superficie de la membrana de sensor;
caracterizado por que cada sensor comprende además:
un elemento dispersivo óptico dispuesto para dispersar el haz de luz de la fuente luminosa para producir un haz de luz dispersado; y
- 35 un detector de luz para recibir una parte del haz de luz tras la reflexión del haz de luz de la superficie de la membrana de sensor y tras la dispersión del haz de luz por el elemento dispersivo óptico, en el que la longitud de onda de la luz recibida en el detector de luz varía en función del desplazamiento de la membrana de sensor y en el que el detector de luz proporciona de manera operativa una salida basándose en cambios en la longitud de onda de la luz recibida.
- 40 23. Uso de un sistema sensor óptico según la reivindicación 21 en una turbina eólica para controlar un parámetro de funcionamiento de la turbina eólica basándose en datos recibidos en un controlador de turbina eólica a partir del sistema sensor óptico.

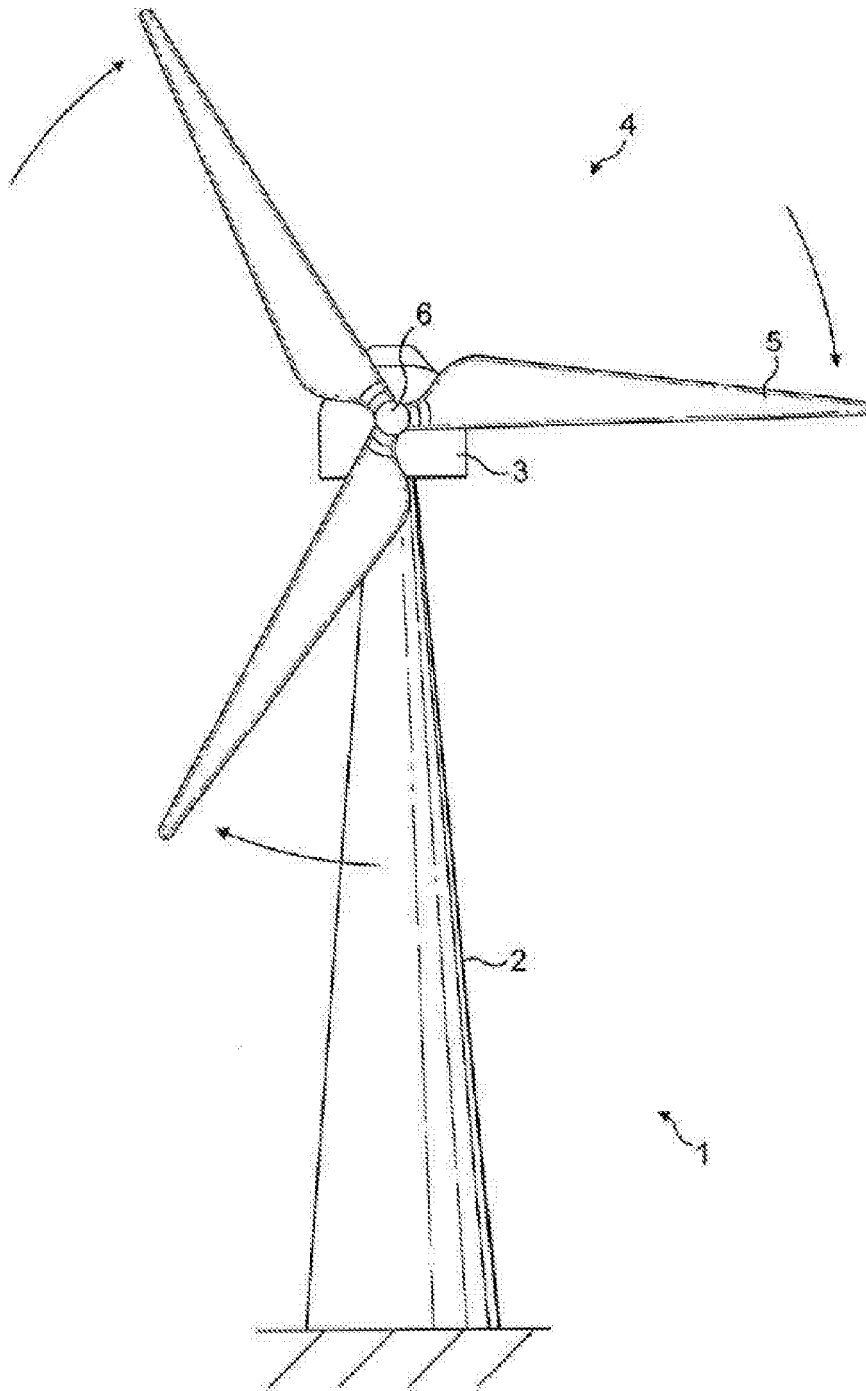


FIG. 1

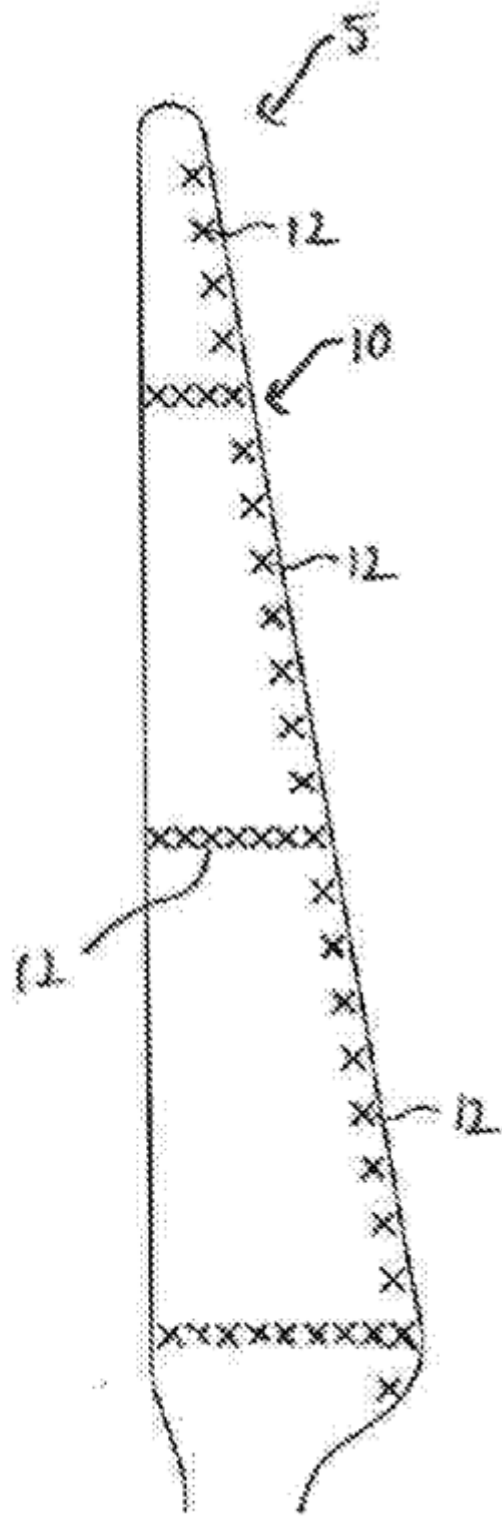
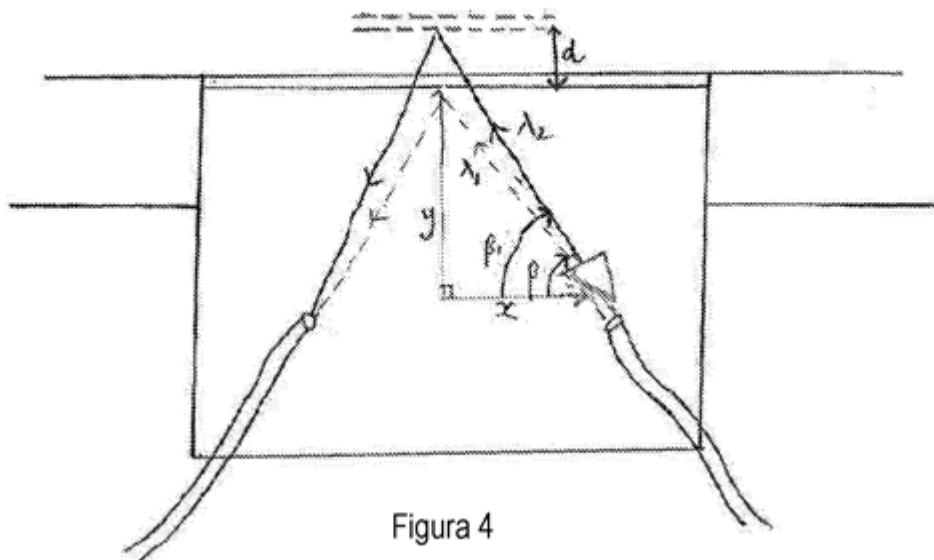
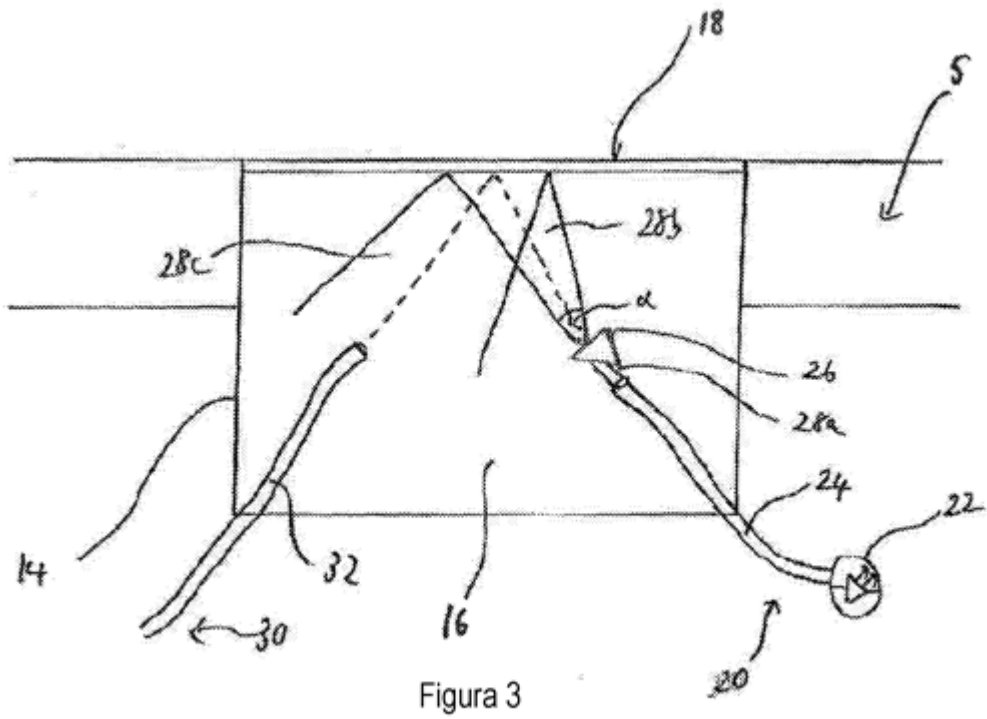


Figura 2



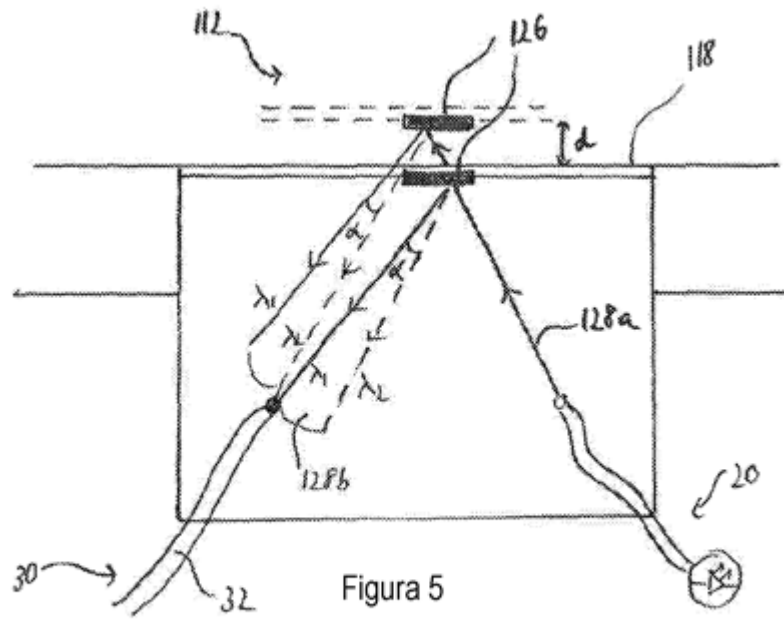


Figura 5

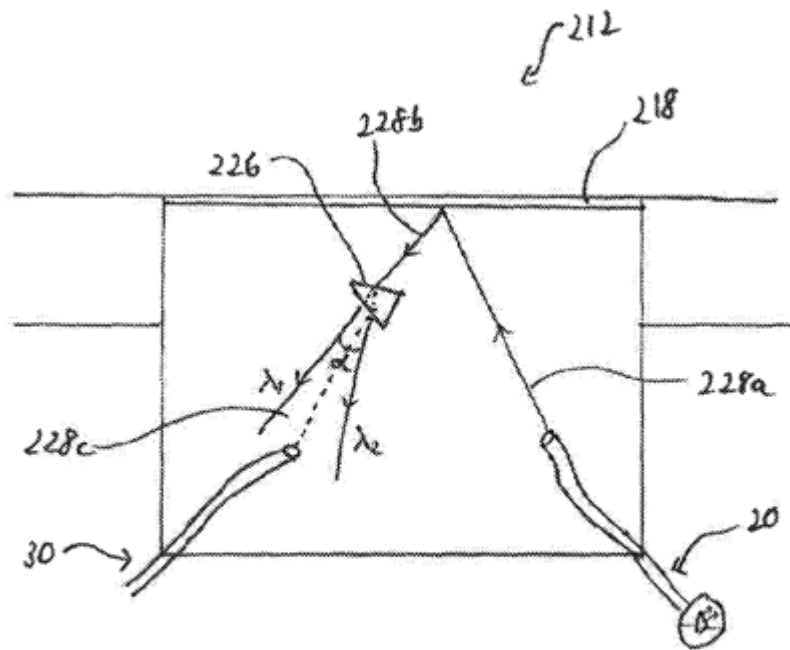


Figura 6

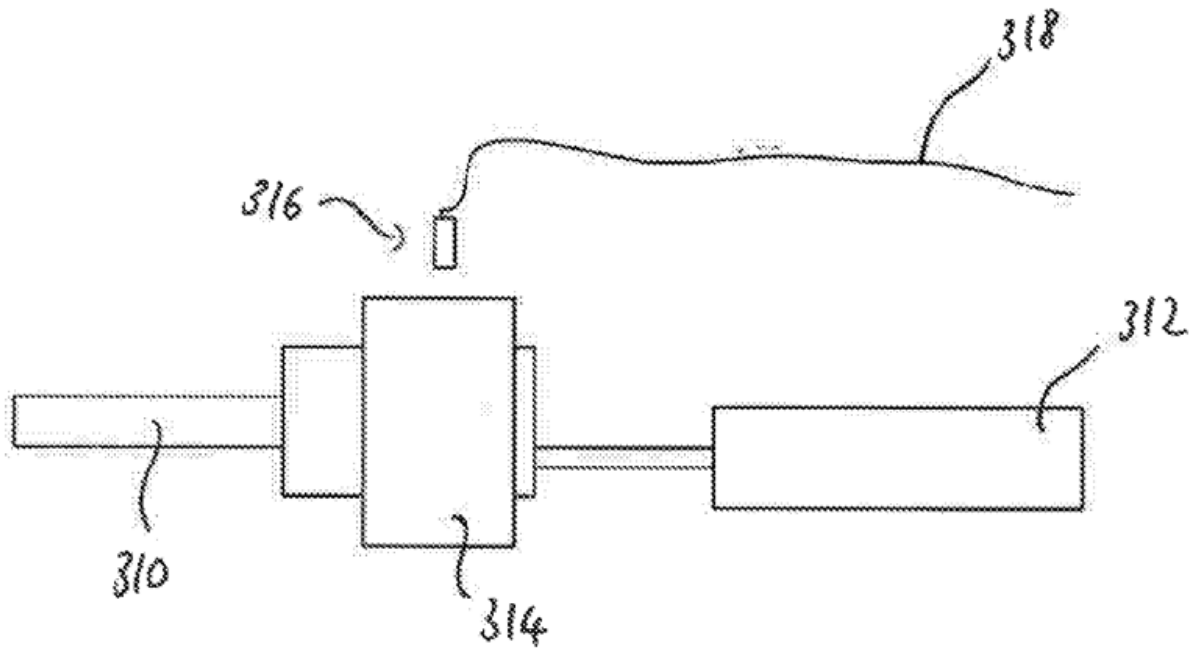


Figura 7