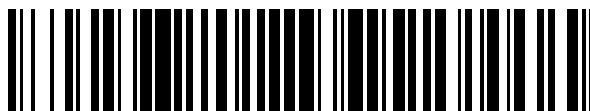


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 553 980**

51 Int. Cl.:

**G01P 5/20** (2006.01)

**G01P 5/26** (2006.01)

**G01P 13/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.05.2012 E 12722067 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.10.2015 EP 2705376**

54 Título: **Un sensor óptico de viento de turbina eólica**

30 Prioridad:

**04.05.2011 DK 201170219**

**05.05.2011 US 201161482627 P**

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

**15.12.2015**

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 2 553 980 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**

Un sensor óptico de viento de turbina eólica

La presente invención se refiere a una instalación eléctrica de energía eólica, y en particular a un sensor óptico de viento de turbina eólica.

5 La figura 1 ilustra una instalación eléctrica de energía eólica tal como una turbina eólica 1. La turbina eólica 1 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 al menos una pala de turbina eólica 5 está montado en un buje 6. El buje 6 está conectado a la góndola 3 a través de un árbol de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde la parte frontal de la góndola. La turbina eólica ilustrada en la figura 1 puede ser un modelo pequeño previsto para uso doméstico o de distribución eléctrica de pequeña escala, o puede ser un modelo grande, tal como los que son adecuados para su uso en la generación de electricidad a gran escala en un parque eólico por ejemplo. En este último caso, el diámetro del rotor puede ser de hasta 100 metros o más.

15 Con el fin de extraer energía del viento de manera segura y eficiente, muchas turbinas eólicas incluyen anemómetros o sensores de viento que proporcionan información sobre la velocidad y dirección del viento incidente. Tal información es útil para monitorizar la cantidad de viento disponible en el sitio para fines de generación de energía, así como para el control. Conocer la dirección del viento permite ajustar la guiñada de la góndola de turbina eólica de modo que las palas del rotor se enfrentan completamente al viento incidente durante momentos de producción de energía. Además, conocer la velocidad del viento permite ajustar el paso de las palas del rotor de modo que la cantidad de energía extraída del viento incidente puede controlarse cuidadosamente para cumplir con las demandas y satisfacer otros parámetros operacionales. Con frecuencia es necesario, por ejemplo, inclinar el plano de las palas del rotor de turbina eólica fuera del viento, o ajustar el paso de las palas del rotor para reducir la presión del viento, para evitar problemas estructurales o sobrecargas eléctricas asociadas con velocidades de viento que son demasiado altas.

20 Por tanto, la información precisa referente a la velocidad y dirección del viento es una entrada crucial en los sistemas de control y monitorización de turbinas eólicas, tales como el sistema SCADA.

25 El entorno operacional en el que se despliegan sensores de viento de turbina eólica puede ser intenso y con frecuencia puede ser la causa principal de muchas dificultades operacionales del sensor. Los anemómetros mecánicos, por ejemplo, son propensos a fallos mediante la acumulación de suciedad y hielo sobre sus partes móviles. Mientras que los sensores de viento eléctricos o basados en láser, tales como los basados en un aparato de tipo LIDAR (detección de luz y alcance) pueden resistir más la suciedad y el hielo, son más sensibles a daños por impactos de rayos que con frecuencia causan problemas a las turbinas eólicas debido a su altura y ubicación. Los sistemas basados en LIDAR también son relativamente caros de instalar.

30 El uso de conductores rayos proporciona una manera de extraer la energía de un rayo alejándola del equipo sensible. Sin embargo, los conductores de rayos no siempre protegerán de manera adecuada el equipo sensor, que debido a que incluye componentes metálicos tales como cableado y circuitos, es igual de sensible a daños por un rayo y a corrientes inducidas.

35 Adicionalmente, muchas turbinas eólicas funcionan con la suposición de que el viento que impacta contra las palas del rotor de turbina eólica se aproxima al rotor de frente, y en una dirección normal con respecto al plano de rotación de las palas del rotor (el plano del rotor). Sin embargo, en la práctica, el viento puede tener con frecuencia una componente significativa en la dirección vertical debido a ráfagas de viento. Estas pueden surgir espontáneamente debido a cambios en las condiciones atmosféricas y la dirección del viento, y algunas veces pueden ser exageradas debido a la forma del terreno en el que está situada la turbina eólica. Muchas turbinas eólicas tienen anemómetros ubicados en la góndola que dirigen la velocidad y dirección del viento incidente, o sistemas basados en LIDAR en el buje del rotor que monitorizan las ráfagas de viento que se aproximan a la turbina. Sin embargo, tales sistemas no están diseñados para detectar ráfagas de viento que se aproximan a la turbina con una fuerte componente vertical. Tales ráfagas de viento pueden dañar gravemente las palas del rotor de turbina eólica si no se detectan por adelantado, y si no se regula el paso de las palas en consecuencia para evitar el choque del viento.

El documento WO 2010/086631 A2 describe un sistema y método de control para una turbina eólica.

El documento WO 2006/063463 A1 describe un velocímetro de tiempo de tránsito óptico.

50 Por tanto, se ha apreciado que existe una necesidad de una instalación eléctrica de energía eólica que tenga un sensor que pueda proporcionar con precisión información sobre el viento incidente con fines de control y monitorización, y que pueda funcionar de manera fiable a pesar de los desafíos mencionados anteriormente.

**Sumario de la invención**

55 La invención se define en las reivindicaciones independientes a las que ahora debe hacerse referencia. En las reivindicaciones dependientes se exponen características ventajosas.

- Según un primer aspecto de la invención se proporciona un sensor óptico de viento de turbina eólica, que comprende: una pluralidad de fuentes de luz montadas en el rotor de una turbina eólica, de tal manera que, en uso, las fuentes de luz giran alrededor del eje de rotación del rotor; en el que cada fuente de luz está colocada para emitir un haz sensor que tiene al menos una primera componente de haz direccional ortogonal al eje de rotación del rotor, y en el que cada haz sensor está constituido por al menos dos componentes de haces sensores paralelos y en el que los haces sensores se proyectan frente a palas del rotor, con un ángulo de entre 10 y 80 grados con respecto al plano del rotor; una pluralidad de dispositivos receptores de luz montados en el rotor, de tal manera que, en uso, las fuentes de luz giran alrededor del eje de rotación del rotor, y en el que la pluralidad de dispositivos receptores de luz están colocados de tal manera que cada haz sensor está asociado con al menos un primer dispositivo receptor de luz respectivo para detectar destellos de luz procedentes de material particulado en el viento que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores; un controlador, acoplado a la pluralidad de dispositivos receptores de luz para procesar los destellos de luz detectados y determinar tiempos de tránsito para material particulado que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores respectivos, y basándose en los tiempos de tránsito detectados proporcionar una indicación de la velocidad y dirección de movimiento del material particulado en el viento.
- Dado que el sensor está ubicado en el rotor de turbina eólica, puede usarse para detectar variaciones instantáneas en la velocidad y dirección del viento en la pala del rotor, y permitir que el controlador actúe inmediatamente para garantizar el funcionamiento seguro de las palas.
- En una realización, los al menos dos haces sensores tienen segundas componentes de haz direccionales que son paralelas al eje de rotación del rotor; y en el que el controlador está configurado para: determinar, a partir de destellos respectivos de los componentes de haces sensores, un tiempo de tránsito para material particulado que pasa a través de cada uno de los al menos dos haces sensores; comparar los tiempos de tránsito respectivos para cada haz sensor; y determinar una indicación de la componente de velocidad vertical para la dirección del viento.
- De esta manera, el controlador puede detectar ráfagas de viento en la dirección vertical que pueden dañar las palas.
- Ventajosamente, el controlador está configurado para determine si la indicación de la componente de velocidad vertical del viento está por encima de un nivel umbral, y emitir una señal de alarma.
- El controlador también puede estar configurado para determinar si la indicación de la componente de velocidad vertical del viento está por encima de un nivel umbral, y si lo está, regular el paso de las palas de turbina eólica para reducir la presión del viento.
- En una realización, el sensor comprende un sensor de orientación para determinar la orientación del buje, o de una o más de las palas, y en el que el controlador registra para cada tiempo de tránsito detectado la orientación de los haces sensores en los que se detectaron los destellos. Esto le permite al sensor funcionar con más fiabilidad.
- En una realización, las fuentes de luz están montadas en las palas del rotor, de tal manera que el haz sensor se proyecta tanto en la dirección longitudinal de la pala como frente a la pala; y en la que los detectores de luz están ubicados en las palas del rotor, adyacentes a fuentes de luz respectivas y colocados para detectar destellos de luz procedentes de material particulado en el viento que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores.
- De esta manera, los sensores están ubicados donde los datos que proporcionan son los más indicativos de la situación operacional en la pala del rotor.
- Los haces sensores se proyectan frente a las palas del rotor, con un ángulo de entre 10 y 80 grados con respecto al eje horizontal. Más preferiblemente, los haces sensores se proyectan frente a las palas del rotor, con un ángulo de entre 30 y 60 grados con respecto al eje horizontal. Esto garantiza una buena relación señal-ruido en los destellos de luz detectados.
- Una pluralidad de fuentes de luz y detectores de luz pueden estar ubicados en cada pala del rotor. Montando los sensores en las palas, el sensor puede usarse para detectar componentes verticales de la velocidad del viento a lo largo de todo el radio de la pala del rotor.
- En una realización adicional, las fuentes de luz y los dispositivos receptores de luz están montados en el buje del rotor. Esto tiene la ventaja de una facilidad de instalación y mantenimiento, y significa que el funcionamiento del sensor es independiente de movimientos de regulación de paso de las palas.
- Una o más de las fuentes de luz y los detectores de luz pueden montarse en una barra que sobresale del buje del rotor. Esto permite que el sistema sensor quede alojado de manera apropiada, independientemente de las dimensiones del buje. La barra puede sobresalir frente al buje del rotor, y montarse para su rotación coaxial con el eje de rotación del buje del rotor.
- En esta disposición, los al menos dos haces sensores están dispuestos en una secuencia, por ejemplo separados 180 grados alrededor del eje de rotación, ya que esto maximiza el efecto de detección.

En una realización, se recopilan datos que indican la componente de velocidad vertical para la dirección del viento a lo largo de un periodo de tiempo prolongado por parte del controlador y se transmiten a un operario de parque eólico. Esto permite que operarios del parque eólico o la empresa de servicios determinen si la ubicación de la turbina eólica tiene propensión a ráfagas de viento en la dirección vertical.

- 5 En una disposición sólo para referencia, las fuentes de luz pueden disponerse en el buje del rotor, de tal manera que se proyectan los haces sensores en paralelo al plano del rotor; y los dispositivos receptores de luz están ubicados en las palas del rotor. Esto proporciona un anemómetro ventajoso, que puede medir la velocidad del viento más cerca de la velocidad del viento libre.

- 10 Ventajosamente, los al menos dos componentes de haces sensores paralelos tienen diferentes longitudes de onda de luz uno en comparación con el otro, y por tanto las reflexiones son de diferentes longitudes de onda. Esto proporciona una mejor detección de tiempos de tránsito, y detectar qué haz se interrumpe en primer lugar da una indicación de la dirección del viento.

Alternativamente, los al menos dos componentes de haces sensores paralelos tienen la misma longitud de onda, pero están dispuestos para emitir destellos con diferentes frecuencias.

- 15 Cada fuente de luz puede comprender una fibra óptica conectada a una fuente de luz optoelectrónica, en la que la fuente de luz optoelectrónica está alojada en una parte eléctricamente protegida de la turbina eólica. Esto garantiza que el sensor es resistente a impactos de rayos.

- 20 Además, el dispositivo receptor de luz puede estar conectado a un detector fotoeléctrico alojado en una parte eléctricamente protegida de la turbina eólica, y el dispositivo receptor de luz y su acoplamiento con el detector fotoeléctrico no son eléctricamente sensibles. Esto garantiza que el sensor es resistente a impactos de rayos.

La fibra óptica de cada fuente de luz puede unirse al mismo emisor de luz optoelectrónico, proporcionando un ahorro de construcción.

También se proporcionan un método y programa informático correspondientes para controlar el sensor óptico de turbina eólica.

## 25 **Breve descripción de los dibujos**

Ahora se describirán realizaciones preferidas de la invención con más detalle, a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos en los que:

la figura 1 es una vista exterior esquemática de una turbina eólica;

- 30 la figura 2 es una vista en alzado lateral esquemática de un sensor óptico de turbina eólica según una primera realización de ejemplo de la invención;

la figura 3 es una vista esquemática detallada del sensor óptico de turbina eólica;

la figura 4 es una ilustración esquemática de un conjunto optoelectrónico usada en el sensor de viento de las figuras 2 y 3;

- 35 la figura 5 es un diagrama simplificado de un primer ejemplo de la fuente de luz mostrada en la figura 3 en un primer ejemplo;

la figura 6 es un primer diagrama que ilustra un principio de detección;

la figura 7 es un segundo diagrama que ilustra un principio de detección;

la figura 8 es un diagrama simplificado del aparato de fuente de luz mostrado en la figura 4 en un segundo ejemplo;

- 40 la figura 9 es un diagrama simplificado que ilustra la dirección de los haces cuando se observan desde enfrente del plano del rotor;

las figuras 10A y 10B ilustran la disposición de los haces sensores en una realización de ejemplo de la invención;

las figuras 11A, 11B y 11C ilustran esquemáticamente los datos recopilados a partir del sensor en una primera y una segunda realización;

la figura 12 ilustra una segunda realización de ejemplo de la invención; y

- 45 la figura 13 ilustra una segunda realización de ejemplo de la invención;

## **Descripción detallada de las realizaciones preferidas**

En términos generales, una realización de ejemplo de la invención comprende una turbina eólica que tiene un sensor óptico de viento. El sensor está alojado dentro de la pala de turbina eólica y está dispuesto para detectar el flujo de aire directamente frente a la pala. En una realización de ejemplo alternativa, el sensor puede alojarse en una barra de montaje ubicada en el buje del rotor, o en el propio buje del rotor. Los datos recibidos del sensor pueden usarse en procedimientos de control para el funcionamiento de la turbina eólica, tal como para determinar el ángulo de guiñada o paso, así como para regular temporalmente el paso de las palas del rotor en condiciones de viento adversas, particularmente aquellas en las que se detecta una ráfaga de viento vertical. Al contrario que los sistemas que implican sistemas de detección de tipo LIDAR, el sistema propuesto es relativamente económico de implementar.

5  
10 Adicionalmente, el sensor óptico de viento usa uno o más haces sensores que comprenden al menos dos componentes de haces individuales de luz que apuntan a lo largo del mismo eje de sensor. Los al menos dos componentes de haces sensores paralelos pueden tener diferentes longitudes de onda de luz, permitiendo que el sistema sensor detecte cuál de los haces de luz se activa en primer lugar cuando material en el viento pasa a través del haz y refleja luz de vuelta a un dispositivo de recolección de luz.

## 15 PRIMERA REALIZACIÓN

Ahora debe hacerse referencia a las figuras 2, 3 y 4 que ilustran una primera realización de ejemplo de la invención.

La figura 2 es una vista en alzado lateral de un sensor óptico de viento de turbina eólica en el que el aparato de detección está alojado principalmente en la pala. La figura 2 muestra el buje del rotor 6 y una única pala 5 conectada al buje del rotor 6 en una parte de raíz de pala 5'. En esta ilustración, la pala 5 se extiende verticalmente en una posición ascendente, mientras que las otras palas colocadas en el buje 6 se han omitido del dibujo por motivos de claridad.

La pala del rotor 5 comprende un primer sensor óptico de viento 10 alojado en el interior de la pala 5, y que comprende una fuente de luz 12 y un dispositivo receptor de luz o detector 14. Estos están ubicados en el borde de ataque de la pala, o alternativamente en el lado de presión o de succión de la pala cerca del borde de ataque, de modo que la luz procedente de la fuente de luz puede proyectarse frente a la pala al interior del viento entrante. En otras realizaciones, los sensores pueden construirse como aletas y disponerse a lo largo de la superficie de la pala en la dirección de la cuerda, o dirigiéndose a barlovento, dispuestos en un recipiente unido o incorporado en la superficie de la pala. Las aletas pueden ser solidarias con la superficie de la pala o estar unidas a la misma. Tal como se apreciará, los sensores también pueden proporcionarse en recipientes de cualquier forma adecuada montados en la pala de turbina eólica.

Un segundo sensor óptico de viento 10' que tiene una fuente de luz 12' correspondiente y un dispositivo receptor de luz 14' también se muestra colocado más adelantado hacia el interior de la pala 5 desde su unión en el buje 6. Pueden alojarse sensores ópticos de viento 10", 10''' (no mostrados) adicionales en la pala 5 y colocarse a lo largo de su eje longitudinal desde la raíz de la pala hasta la punta de la pala, según se desee. También se instalan sensores 10 en las otras palas del rotor 5 que no se muestran en la figura 2.

Los sensores ópticos de viento primero 10 y segundo 10' están conectados a un conjunto de equipos optoelectrónicos 18, que se muestran en este caso alojados en el buje del rotor 6, mediante fibras ópticas 16 y 16'. Esto permite que un único conjunto de equipos 18 recopile los datos de sensores ópticos de viento 10 respectivos alojados en las diversas palas del rotor 5. Alternativamente, el conjunto de equipos optoelectrónicos 18 puede alojarse en la góndola 3, o en una realización distribuida, alojarse en las palas del rotor 5 con un procesador central ubicado en una ubicación tal como el buje 6 o la góndola 3 para facilidad de acceso.

Cada pala 5 también comprende preferiblemente un sensor de orientación 19 conectado al controlador 18. El sensor de orientación 19 proporciona una indicación de la dirección en la que apunta el eje longitudinal de la pala, o la punta de la pala, en otras palabras, el ángulo entre un eje de referencia fijo, tal como la horizontal o la vertical, y una línea trazada desde la raíz hasta la punta de la pala. En algunas realizaciones, conocer la posición angular de la pala 5 resulta ventajoso, aunque no esencial, para que el controlador 18 use los datos recibidos de los sensores ópticos de viento 10 y 10' tal como se describirá a continuación.

Dado que en la técnica se conocen varios sensores de orientación diferentes, el funcionamiento del sensor 19 no se describirá en detalle en este caso.

50 Ahora se describirá el sensor óptico de viento 10 con más detalle con referencia a las figuras 3 y 4.

Las fibras ópticas 16 conectadas al primer sensor 10 comprenden fibras separadas 161 y 162. Un extremo de fibra óptica 161 se conecta a una fuente de luz optoelectrónica 180 alojada en el conjunto de equipos optoelectrónicos 18 (véase la figura 4), mientras que el otro extremo termina cerca de la superficie de la pala con el fin de formar la parte de emisión de luz de la fuente de luz 12. La fuente de luz optoelectrónica 180 puede incluir uno o más LED, láseres, fuentes de halógeno o halogenuro metálico conectados a la fibra óptica 161.

La fibra óptica 161 se mantiene en su sitio en la fuente de luz 12 mediante un soporte 120 conectado al interior del

cuerpo de la pala. La fuente de luz 12 también comprende un elemento óptico 122 dispuesto frente al extremo de la fibra óptica 161 para recibir luz emitida desde la fibra óptica 161. El elemento óptico 122 puede comprender uno o más de una lente o prisma óptico, tal como se comentará con más detalle en relación con los siguientes ejemplos. Por tanto, la fuente de luz optoelectrónica 180 alojada en el buje 6 emite luz al interior de un extremo de la fibra óptica 161, que después emerge en la fuente de luz 12. La luz emitida desde el extremo de la fibra óptica 161 se separa en dos haces mediante el elemento óptico 122, y emerge a través de un orificio o abertura 124 en la superficie de la pala. La disposición de la fibra óptica 161 en el soporte 120, el prisma óptico y la abertura 124 provocan que la luz emitida se proyecte frente al borde de ataque de la pala con un ángulo con respecto a la superficie de la pala. En la práctica, se ha encontrado que un ángulo de 30 a 60 grados funciona bien, aunque el ángulo también puede estar en el intervalo de 10 grados a 80 grados. Tal como se apreciará a partir de la siguiente valoración, los sensores dispuestos a ángulos menores darán generalmente como resultado menos variación de los tiempos de tránsito de datos que pueden atribuirse al ángulo del viento incidente, y los datos necesitarán más procesamiento para extraer la señal de dirección del viento.

El dispositivo receptor de luz 14 comprende preferiblemente una lente colectora 142 y fibra óptica asociada 162. La lente colectora 142 tiene una gran abertura para captar luz, y en el ejemplo descrito en el presente documento, puede tener un tamaño en el intervalo de 1 a 5 cm. En otras implementaciones, el tamaño de la lente puede ajustarse a escala de manera apropiada.

La fibra óptica 162 se fija dentro de la pala 5 mediante un soporte 144, colocando la fibra óptica 162 de modo que puede recibir luz captada por la lente 142. Puede proporcionarse una lente de enfoque 146 adicional entre la lente colectora 142 y el extremo de la fibra óptica 162 para aumentar la proporción de la luz captada por la fibra óptica 162. La fibra óptica 162 se acopla a un detector de luz 182 en el conjunto optoelectrónico 18.

Ahora se describirá el conjunto optoelectrónico 18 con más detalle con referencia a la figura 4. El conjunto de equipos optoelectrónicos 18 comprende uno o más dispositivos de emisión de luz optoelectrónicos 180, y uno o más dispositivos de detección de luz 182. El número de fuentes 180 y detectores 182 respectivos puede ajustarse a medida para adaptarse al número de sensores ópticos 10 montado en las palas 5. Puede usarse un único emisor y detector para todos los sensores 10, para cada pala respectiva, o para cada sensor individual. Tal como resultará evidente a partir de la siguiente valoración, en algunas realizaciones la fuente de luz optoelectrónica 180 está configurada para emitir luz a al menos dos longitudes de onda por el interior de la fibra óptica 161 para su emisión en la superficie de la pala.

Un controlador 184 se conecta al dispositivo de emisión de luz 180, al dispositivo de detección de luz 182, y al sensor de orientación de la pala 19, e incluye una memoria y un procesador en el que se almacena software de control para controlar la pluralidad de sensores ópticos de viento 10, y analizar los resultados.

Ahora se describirá el funcionamiento del primer sensor de viento con más detalle con referencia a las figuras 5 a 13. En esta realización, cada uno de los sensores funciona de la misma manera.

En el ejemplo mostrado en las figuras 2 y 3, cada fuente de luz 12 emite luz a dos longitudes de onda diferenciadas. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 5 mediante las dos fibras ópticas 161 a y 161 b, que están sustancialmente alineadas entre sí, y que emiten un haz de luz sustancialmente en la misma dirección. Evidentemente, no es necesario hacer que cada haz de luz se produzca mediante una fibra óptica separada, y a continuación se describirá un ejemplo usando sólo una única fibra por fuente de luz 161 (tal como se ilustró anteriormente).

Los dos haces de luz, que tienen longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  respectivas, se dirigen sobre el elemento óptico 122, en este caso una lente 122a, que enfoca cada haz en una región focal 20, a cierta distancia frente a la lente colectora de luz 142 del detector de luz 14. Una distancia típica es de 10 a 30 cm. En este ejemplo, el diámetro del punto focal 20 de los haces está en el intervalo de 5 mm a 20 mm.

Dentro de la región focal 20, cada haz tiene un punto focal 22 y 24 separado. Se hace que los puntos focales 22 y 24 se encuentren a lo largo del eje de sensor 26, con una separación recomendada entre cada punto focal. La separación puede estar por ejemplo en el intervalo de 0,1 mm a 10 mm.

A pesar del hecho de que los dos componentes de haces de luz están enfocados, en una región focal 20, se denominarán haces paralelos para los fines de esta valoración. Se pretende que esto enfatice el hecho de que los dos haces son componentes individuales de un único haz sensor compuesto, y por tanto apuntan sustancialmente en la misma dirección y actúan juntos para detectar el tránsito de material particulado. Se apreciará, por ejemplo, que el efecto de enfocar los haces es únicamente ayudar a la detección en el dispositivo receptor de luz 14, y que el aparato de enfoque 122a puede omitirse si esto no es perjudicial para el funcionamiento. En este caso, los componentes de haces no enfocados pueden ser realmente paralelos, aunque entonces la detección en el dispositivo receptor de luz no será fácil de llevar a cabo. En realizaciones descritas posteriormente, no es necesario enfocar los haces y los haces pueden ser paralelos en un sentido más estricto.

El sensor de viento funciona detectando destellos de luz procedentes de cada haz sensor, a medida que partículas de material transportadas en el viento pasan a través de la región focal 20 y reflejan la luz procedente de cada haz

hacia la lente 142. El aire de calidad normal comprende normalmente una cantidad suficiente de tal material como para que pueda detectarse el tránsito de partículas, con la condición de que se elija una longitud de onda adecuada de la luz. De este modo pueden detectarse fácilmente partículas de vapor de agua, polvo o polen.

5 La figura 6 ilustra el principio con más detalle. El lado izquierdo de la figura 6 ilustra el destello de luz (indicado mediante una X) en el punto focal 22 y 24 de cada haz, que se produce a medida que una partícula en el aire se desplaza a lo largo del eje de sensor 26, en este caso en el sentido ascendente. Suponiendo que la separación entre los dos puntos focales de haz 22 y 24 es de unos pocos mm, entonces el destello en el punto focal 22 se producirá ligeramente antes que el destello en el punto focal 24. Suponiendo que la velocidad del viento es de unas pocas decenas de metros por segundo, el tiempo entre destellos puede ser muy pequeño, por ejemplo de partes de  
10 segundo. En última instancia se necesita medir este tiempo de tránsito si tiene que entenderse la velocidad de la partícula, y el viento en el que se transporta.

El tiempo de tránsito puede medirse con dos haces que tienen la misma longitud de onda. Sin embargo, resulta ventajoso si los haces tienen diferentes longitudes de onda ya que esto facilita la detección, y proporciona información sobre la dirección del tránsito de la partícula. Ahora se comentará esto con más detalle.

15 Si la luz de cada haz tiene la misma frecuencia o longitud de onda, entonces, en términos prácticos, la única información disponible a partir de los destellos de luz será el tiempo de tránsito. Puede ser posible intentar detectar qué haz se activa en primer lugar, y por tanto deducir la dirección en la que está moviéndose la partícula, pero esto requiere procesamiento y equipos de alta resolución, conduciendo en última instancia a un mayor coste.

20 Estas dificultades se mitigan en el presente ejemplo de la invención mediante el uso de haces de diferentes longitudes de onda. Las diferentes longitudes de onda permiten que el equipo de procesamiento determine qué haz se activa en primer lugar, no mediante un análisis visual de la posición espacial en la que se originó el destello, sino basándose en la longitud de onda del destello, y el orden en el que se producen los destellos. Para una partícula que se mueve de arriba abajo como en el ejemplo de la figura 6, el sensor verá por tanto dos destellos de longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  y puede deducir la dirección de desplazamiento a partir del orden  $\lambda_2, \lambda_1$ .

25 En la figura 7 se muestra una ligera modificación del ejemplo, en la que también se usan haces tercero y cuarto para la detección. En este ejemplo, los haces adicionales tienen la misma longitud de onda que los haces primero y segundo, y por tanto pueden generarse mediante uno o más divisores de haces incorporados en los elementos ópticos 122 acoplados a las fibras ópticas 161.

30 La ventaja de usar cuatro haces es que el tránsito de una partícula viene entonces indicado por cuatro destellos de diferentes longitudes de onda que se producen a intervalos de tiempo separados por igual. Esto hace que la señal para el tránsito de una partícula sea más fuerte que en el caso de tan sólo dos destellos, y por tanto más fácil de distinguir del ruido de fondo. Por ejemplo, si uno de los destellos de luz reflejada en el cuarto no es tan intenso como los demás, la presencia de los destellos o bien antes o bien después (siempre que se produzcan en el momento correcto), permite detectar el tránsito de partículas con cierta certeza a pesar del destello individual que falta o está  
35 debilitado. Con sólo dos destellos, la ausencia de una señal fuerte incluso para tan sólo uno de los destellos puede introducir una gran cantidad de incertidumbre en la detección.

Además, el uso de cuatro haces aumenta la distancia que tiene que desplazarse la partícula, aumentando su tiempo de tránsito, y por tanto mejorando la precisión en la medición de la velocidad de partícula. El orden en el que se disponen los haces no es relevante, siempre que la disposición no sea simétrica y puede por tanto usarse para  
40 determinar la dirección. Habiendo dicho esto, se prefiere agrupar los haces entre sí por longitud de onda, tal como  $\lambda_1, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_2$ , tal como se muestra en la figura, ya que esto hace que la parte direccional de la señal resultante sea más fuerte. Evidentemente, puede usarse cualquier número de haces en el sensor, según se desee.

45 Las longitudes de onda de los haces también proporcionan una mejor relación señal-ruido para las señales del sensor, ya que pueden distinguirse más fácilmente tránsitos de partículas separados unos de otros. Esto se debe a que cada acontecimiento de tránsito estará representado como dos destellos de luz de diferentes longitudes de onda próximos en el tiempo. Por tanto, el par de destellos marca una apertura y un cierre para cada acontecimiento de tránsito. Sin esta distinción, lo único que se detectaría sería un par de destellos de luz en medio de un fondo de otros destellos. Entonces los pares de destellos que representan un acontecimiento de tránsito deben distinguirse unos de otros basándose simplemente en el tiempo (es decir, el tiempo entre dos destellos en un par es más corto que el  
50 tiempo entre dos destellos en pares adyacentes).

La figura 8 ilustra un segundo ejemplo de aparato de fuente de luz, que es ventajoso cuando tienen que usarse varios haces de luz con diferentes longitudes de onda en el sensor. La fuente de luz comprende una única fibra óptica 161 conectada a la fuente de luz optoelectrónica 180 como antes. Se introduce una pluralidad de diferente haces de luz, cada uno con una longitud de onda diferente, en la fibra óptica y se transmiten a lo largo de su longitud  
55 como un haz compuesto. Al emerger de la fibra óptica 161, el haz compuesto se dirige a un prisma óptico 122b, incluido en el elemento óptico 122, que divide el haz en un haz separado para cada una de sus longitudes de onda componentes respectivas. El prisma óptico 122b dirige los haces individuales sobre la lente óptica 122a como antes. Usando esta disposición, puede usarse fácilmente cualquier número de haces de diferente longitud de onda en el

sensor.

Ahora se describirá el procesamiento de las señales procedentes de los sensores 10 mediante el controlador 184 con más detalle.

5 El controlador 184 consulta periódicamente a los sensores ópticos de viento 10 en cada pala y el sensor de orientación 19 y de ese modo asocia cada lectura de tiempo de tránsito de una partícula que atraviesa los haces sensores con una pala particular 5, y con un valor que indica la orientación de la pala en el momento en el que se tomó la lectura. De esta manera, a medida que cada pala 5 gira alrededor del buje del rotor 6 se recopilarán continuamente lecturas de diferentes sensores y se almacenarán para cada ángulo de rotación. Aunque este procedimiento se produce para los sensores en cada una de las tres palas 5 al mismo tiempo, el procedimiento de consulta puede ser en paralelo, transmitiendo los sensores 10 de vuelta al controlador 184 simultáneamente, o en serie, consultando el controlador 184 a cada sensor por turnos.

15 Por motivos de simplicidad, ahora se considerará un caso en el que el viento se aproxima al rotor de turbina eólica 6 en una dirección de frente (de izquierda a derecha en el plano de la página de la figura 2), y además que las tres palas de turbina eólica están estacionarias. Aunque los haces sensores procedentes de las fuentes de luz 12 están inclinados con respecto al borde de ataque de la pala, se apreciará que cuando se observan las palas 5 desde la dirección de frente (desde enfrente del buje del rotor 6), los haces sensores parecerán ser paralelos a la dirección en la que se extienden las palas desde el buje 6 (y en el ejemplo de la figura 2) apuntando ligeramente hacia fuera desde el buje (aunque pueden igualmente apuntar hacia dentro). Por tanto, en el plano del rotor los haces sensores producidos por los sensores 10, 10', etc., en una pala 5 están inclinados 120 grados con respecto a los haces sensores de un segundo sensor en una segunda pala del rotor (suponiendo tres palas separadas por igual).

20 En el plano del rotor, la situación será por tanto tal como se ilustra en la figura 9, tres direcciones de haces sensores correspondientes a una separación angular de 120 grados. Los haces saldrán en realidad de la página (debido al ángulo con el que están instaladas las fibras ópticas en las palas) formando un cono poco profundo frente a la pala del rotor. El propósito principal del cono es ubicar el punto focal 20 para detectar la partícula ligeramente frente a las palas 5, de modo que la luz dispersada pueda detectarse por el dispositivo receptor de luz 14 instalado en la pala.

30 Tal como se muestra en la figura 10, el hecho de que los haces sensores estén inclinados con respecto al plano del rotor, permite que el sistema sensor detecte si el viento se aproxima a la pala del rotor de manera perpendicular al ángulo del plano del rotor, o con un ángulo. La figura 10A muestra el caso en el que el viento se aproxima de manera perpendicular a la pala del rotor, y atraviesa los haces sensores de al menos dos de las palas del rotor 5 (los haces sensores procedentes de las dos palas se muestran en las mitades superior e inferior omitiéndose el buje del rotor). En este caso, se supone que el ángulo de los haces sensores con respecto a la vertical, o con respecto al plano del rotor, es de 45 grados.

35 La distancia recorrida por el material particulado en el viento a través de cada uno de los haces de pala es la misma cuando el viento sopla horizontalmente debido a la simetría de rotación de la orientación de la pala. Esto será cierto independientemente de la orientación de las palas 5 individuales, y de los haces. Por tanto, el tiempo de acontecimientos de tránsito de partículas respectivos, indicado por el tiempo que transcurre entre los destellos de luz de diferente longitud de onda detectados en el sensor 10, será en gran medida el mismo para cada pala independientemente de la orientación de la pala.

40 Sin embargo, en la figura 10B se ilustra una situación en la que la dirección del viento no es perpendicular al plano del rotor, sino a un ángulo. En esta situación, la distancia recorrida por material particulado en los haces sensores es muy diferente. La trayectoria de transmisión a través del haz sensor superior será corta (ya que el tránsito es perpendicular a la dirección del haz), mientras que el tiempo de tránsito para el haz inferior será mucho más largo, si es siquiera detectable como acontecimiento de tránsito (no será detectable cuando el material particulado pase a través de los ejes de punto focal 26a de manera perpendicular y los haces sensores paralelos no se activen debidamente en secuencia).

45 El tiempo de acontecimientos de tránsito de partículas respectivos, indicado mediante el tiempo que transcurre entre los destellos de luz de diferente longitud de onda que se detectan en el sensor 10, será por tanto en gran medida diferente para cada una de las palas 5, dependiendo de la orientación de la pala con respecto al buje. Esta diferencia en el tiempo de tránsito indica que el viento está aproximándose a la pala de turbina eólica con un ángulo que no es perpendicular al plano del rotor, sino con un ángulo con respecto al mismo.

50 Como resultado, se usa una comparación de tiempos de tránsito para material particulado que atraviesa los haces sensores de diferentes palas para dar una indicación de la componente vertical de la velocidad del viento, concretamente la componente que es paralela al plano de rotación de las palas del rotor u ortogonal al eje de rotación del rotor. Valores similares de tiempos de tránsito indican que no hay ninguna componente vertical significativa, mientras que tiempos diferentes indican una componente vertical significativa, y posible peligro para el rotor.

El controlador 184 monitoriza por tanto las señales de tiempo de transmisión que se reciben de los sensores instalados en las diferentes palas del rotor 5, y determina una indicación de la componente de viento vertical a partir



de la distribución de tiempos de tránsito. Las figuras 11A, B y C ilustran las diferentes distribuciones para las situaciones descritas anteriormente. En la figura 11A, los tiempos de tránsito se recopilan a partir de cada sensor 10 y a partir de cada pala 5 y pueden representarse gráficamente en un gráfico frente a la orientación de la pala tal como se muestra. Con fines de ilustración, se supone que una orientación de cero grados corresponde al caso en el que la pala de turbina eólica 5 está apuntando directamente hacia arriba.

Una distribución plana indicada en la figura 11A indica que la dirección del viento es en gran medida perpendicular al plano del rotor, o paralela al eje de rotación. Por otro lado, la figura 11B ilustra la situación en la que el viento está inclinado con respecto al plano del rotor, y sopla en un sentido ascendente (como en la figura 10B), es decir que el viento no impacta en el rotor de turbina eólica de frente, sino que llega desde debajo del buje. En esta situación, los tiempos de tránsito indicados por los sensores 10 en la pala 5 cuando está en la posición verticalmente ascendente son pequeños (menores que para la figura 11A) ya que la dirección del viento sigue o se aproxima a una línea perpendicular a la dirección del haz sensor, cortando de ese modo el haz sensor con la trayectoria más corta. Sin embargo, los tiempos de tránsito para los sensores en las palas 5 en otras orientaciones son más largos, ya que el haz sensor se aleja de un ángulo perpendicular a la dirección del viento y se acerca a una dirección paralela a la dirección del viento. Cuando la pala está apuntando verticalmente hacia abajo (con una orientación de más o menos 180 grados) el tiempo de tránsito es esencialmente infinito, o en la práctica indetectable.

Si el viento llegara desde el sentido opuesto al mostrado en la figura 10B, es decir desde encima del buje de turbina eólica e inclinado hacia abajo, entonces la distribución de tiempos de tránsito tendría el aspecto mostrado en la figura 11C.

Tal como se comentó anteriormente, el controlador 184 usa la información de tiempo de tránsito para determinar la dirección del viento con respecto al eje vertical. Las ráfagas de viento en esta dirección pueden ser problemáticas ya que pueden dañar la turbina eólica y la palas de turbina eólica. Al detectar cuándo el viento está soplando apartándose del eje horizontal (figura 10A), que tiene una componente significativa en la dirección vertical, el controlador puede emitir una señal de alarma, y hacer que la turbina eólica tome medidas para protegerse a sí misma, tales como ajustar el paso de la pala para reducir la presión del viento, u otra manera de reducir la salida de producción y por tanto, por ejemplo, las cargas sobre la turbina.

Los cambios en la dirección del viento pueden producirse muy rápidamente, a lo largo de un periodo de tiempo que oscila entre menos de un segundo y unos pocos segundos. La velocidad de rotación de la palas de turbina eólica es mucho más lenta que estas variaciones, aproximadamente de 5 a 20 veces por minuto. Aunque una pala tardaría al menos tres segundos en realizar una revolución completa, tres palas sólo tardan 1 segundo (a altas velocidades de rotación) en barrer completamente los 360 grados del rotor. Por este motivo, en la práctica resulta ventajoso si el controlador 184 basa su análisis en los tiempos de tránsito que se recopilan de manera continua a partir de las palas 5.

Además de esta técnica de detección, el controlador 184 puede recopilar y analizar los datos de tiempo de tránsito, recopilados a lo largo de un periodo de tiempo más largo para obtener datos promedio de dirección del viento. Esto no detectará ráfagas de viento que podrían provocar que se dañe la turbina eólica, pero indicarán para cualquier turbina eólica dada si hay una tendencia a que el viento impacte en el rotor desde direcciones que se encuentran alejadas del eje horizontal, y por tanto indicará si es probable que la turbina eólica se someta a una tensión significativa que pueda reducir su vida útil. Tal información del controlador 184 puede transmitirse entonces al operario del parque eólico o la empresa de servicios para su análisis y registro.

El funcionamiento del controlador 184 para detectar direcciones de viento alejadas del eje horizontal puede implementarse con tan sólo un único sensor 10 por pala de turbina eólica 5, tal como se comenta a continuación en las realizaciones alternativas, o con una pluralidad de sensores 10 por pala. Sin embargo, tener una pluralidad de sensores dispuestos a lo largo del eje longitudinal de la pala permite que el controlador 184 detecte la componente de viento vertical a diferentes radios medidos desde el buje a lo largo de todo el barrido del rotor. Esto permite que la indicación de alarma del controlador, cuando se detectan fuertes direcciones de viento orientadas verticalmente, sea más sensible. Por ejemplo, es menos probable que componentes verticales fuertes del viento detectadas cerca de la raíz de la pala y el buje 6 sean problemáticas que componentes verticales fuertes del viento cerca de la punta de la pala, en la que la pala tiene una forma aerodinámica y es más flexible, y puede golpear la torre si se deforma demasiado.

Además, aunque en el ejemplo anterior los acontecimientos de tiempo de tránsito de material particulado que interrumpen los haces se registran mediante el controlador con la orientación respectiva de los haces sensores (o bien en la pala o bien posteriormente en el buje tal como se describirá con referencia a la segunda realización), la detección de orientación no es necesaria y en realizaciones alternativas puede omitirse. Incluso sin la información del sensor de orientación, resultará evidente que los gráficos ilustrados en la figura 11 pueden generarse como una serie a lo largo del tiempo de datos recibidos de cada sensor, y generalmente mostrarán una periodicidad a medida que giran los haces sensores. Por tanto, el controlador todavía puede usar esta información en su comparación de los datos de haz sensor y detectar un error de guiñada que está presente. Sin embargo, normalmente se prefiere el uso del sensor de orientación 19 ya que permite el funcionamiento relativamente instantáneo del sensor sin que sea necesario acumular datos a lo largo de un periodo de tiempo prolongado.

Ahora se describirán ejemplo realizaciones adicionales de la invención con referencia a las figuras 12 y 13.

SEGUNDA REALIZACIÓN

5 La figura 12 ilustra un ejemplo de la invención en el que los emisores de luz 12 y detectores de luz 14 están montados en una barra 7 conectada al buje 6. La barra está montada en la parte frontal del buje de modo que, a medida que el buje 6 gira, la barra 7 gira coaxialmente y alrededor de su eje longitudinal, y el eje de rotación del rotor 4. La pluralidad de emisores de luz 12 están ubicados en la barra y emiten pares respectivos de componentes de haces sensores alejándolos de la barra y con un ángulo con respecto a su eje longitudinal formando un cono. El cono puede extenderse hacia, o alejándose de, las palas del rotor 5. Los emisores de luz 12 están ubicados alrededor de la circunferencia de la barra y por tanto emiten los haces sensores con diferentes ángulos en el plano del rotor. Tal como se mostró anteriormente para la figura 9, puede haber tres emisores de luz ubicados alrededor de la circunferencia de la barra, en cuyo caso los haces sensores están dispuestos a 120 grados unos de otros. En este ejemplo, dado que la ubicación de los emisores de luz 12 y los dispositivos receptores de luz 14 no está limitada por el número de palas del rotor 5, sin embargo, puede proporcionarse cualquier número de haces sensores, tal como cuatro haces sensores con un ángulo de 90 grados entre ellos.

15 Una pluralidad de dispositivos receptores de luz 14 también están ubicados en la barra 7 para detectar luz dispersada procedente de material particulado que pasa a través de los haces sensores, mientras que un sensor de orientación 19 ubicado en la barra también indica para cada emisor de luz 12 y dispositivo receptor de luz 14, la orientación del par emisor-receptor. Se apreciará que cualquiera de los emisores de luz 12, receptor de luz 14 y sensor de orientación 19 también puede proporcionarse en el buje del rotor 6, en vez de en la barra 7.

20 Con el fin de garantizar el funcionamiento en todas las condiciones, puede proporcionarse un elemento de calentamiento (no mostrado) en el buje del rotor 6 o en la barra 7 para fundir cualquier hielo que se haya acumulado. Además, también puede proporcionarse una funda o cubierta hueca, de extremo abierto, que recubre los emisores de luz 12 y detectores 14 con el fin de impedir la acumulación de suciedad u otro material. Preferiblemente el elemento de calentamiento no es eléctricamente conductor y está fabricado de un material duradero.

25 La barra 7 puede construirse a partir de un material tal como plástico con refuerzos de fibra de fibra de vidrio o carbono. También pueden usarse otros materiales no conductores, resistentes a la intemperie. De manera similar, la cubierta puede construirse a partir de los mismos materiales, o a partir de materiales deformables más ligeros tales como un polímero, por ejemplo caucho, caucho natural, polipropileno, polietileno, nailon, elastómeros, kevlar, o similares.

30 En esta realización, el funcionamiento del sistema sensor óptico es idéntico al descrito anteriormente para la primera realización, excepto porque la ubicación física de las fuentes de luz 12 y los dispositivos receptores de luz 14 está en el buje del rotor 6 en vez de en las palas. En una realización alternativa, los sensores 10 pueden incorporarse en una aleta colocada en el buje, y disponerse para dirigirse hacia dentro a lo largo de la superficie de la pala.

35 El sistema sensor de esta realización no es sensible a movimientos de las palas, ni a cambios en el paso de la pala. Sin embargo, al contrario que la primera realización, no puede dar una indicación de la componente vertical a lo largo del radio completo del rotor 4. Esta realización puede usarse junto con la primera realización o por separado.

Una disposición sólo para referencia

40 La figura 13 ilustra una disposición sólo para referencia, en la que los emisores de luz 12 están ubicados en el buje del rotor 6, y los dispositivos receptores de luz 14 están ubicados en las palas de turbina eólica 5. Las fuentes de luz 12 están dispuestas de modo que emiten los dos haces sensores en una dirección paralela al plano del rotor y frente a la pala del rotor 5. Los emisores de luz 12 en esta implementación de ejemplo son más potentes, y pueden comprender un dispositivo láser, que en los ejemplos descritos anteriormente ya que los haces que emiten deben desplazarse a lo largo de la longitud de la pala del rotor 5 a lo largo de la cual están situados los detectores de luz 14. Por este motivo, los componentes de haces individuales no se enfocan sino que se disponen para ser paralelos entre sí a lo largo de la longitud de la pala. Evidentemente, los haces pueden enfocarse si sólo hay un único dispositivo receptor de luz 14 ubicado en las palas 5, y los haces tienen que actuar conjuntamente con los dispositivos 14.

50 Dado que en esta disposición los haces no están inclinados con respecto a la pala y no es posible determinar si el viento está aproximándose al rotor de turbina eólica desde abajo o desde arriba de la manera descrita anteriormente para la figura 11. Sin embargo, la disposición sí proporciona una disposición de anemómetro ventajosa, en la que el tiempo de tránsito de material particulado que pasa por los haces se usa para proporcionar una indicación de la velocidad del viento en el rotor (suponiendo que la dirección del viento es en gran medida horizontal con respecto al plano del rotor). Dado que la velocidad del viento se detecta frente a las palas del rotor, esto da una lectura que es más próxima a la velocidad del viento en corriente libre que cuando el anemómetro está ubicado encima de la góndola de turbina eólica. Por tanto, para que el anemómetro funcione correctamente es necesario garantizar que el rotor de turbina eólica está dirigido hacia al viento.

55 En la técnica se conocen bien métodos y aparatos para lograr esto, y por tanto no se describirán aquí.

Con el fin de compensar los cambios en el paso de las palas del rotor 5 durante el funcionamiento, el emisor de luz y el detector pueden necesitar tener una característica ancha/plana, de tipo ovalado, que tiene un alcance focal con el fin de que el detector pueda detectar la luz incluso cuando se regula el paso de la pala, al menos algunos grados.

5 Esta disposición puede usarse junto con cualquiera o ambas de las realizaciones primera y segunda, o por separado.

En las realizaciones primera y segunda y la disposición, se entenderá que los haces sensores tienen una componente de haz ortogonal al eje de rotación del rotor, y paralela al plano del rotor.

10 En los ejemplos de la invención descritos anteriormente, la longitud de onda óptica o frecuencia de la luz se usa para distinguir un haz sensor individual de otro y posteriormente proporcionar información referente a la dirección de tránsito del viento. En una realización alternativa adicional, la longitud de onda de los haces individuales puede ser constante, pero puede hacerse que los haces parpadeen y posteriormente se distingan unos de otros por su frecuencia de parpadeo.

15 Con el fin de garantizar que las partículas en el viento pueden detectarse, es decir que no pasan a través del haz mientras el haz está apagado, la frecuencia de parpadeo debe fijarse lo suficientemente alta. Dado que la velocidad del viento de interés puede ser del orden de decenas de metros por segundo, y la anchura del haz es del orden de milímetros, el tiempo que pueden pasar las partículas en el viento en el haz puede ser inferior a 50 microsegundos. Por tanto, se necesitará que la frecuencia de parpadeo de la luz sea del orden de 1 MHz o mayor para garantizar que puede obtenerse una imagen de la transmisión de partículas. En la práctica, frecuencias superiores a 100 MHz pueden ser útiles.

20 En el detector, que en este caso puede ser un único diodo PIN, por ejemplo, la luz recibida de los haces individuales respectivos se añadirá dependiendo de cuál de los haces está cortando la partícula y cuándo. Sin embargo, la señal del sensor de cada haz individual tendrá su propia firma dependiendo de su frecuencia de parpadeo individual, permitiendo aislar la señal procedente de un haz particular de las demás usando filtrado. Tal filtrado puede lograrse usando filtros de paso de banda tradicionales o electrónica óptica digital más complicada. Cuando se eligen las frecuencias de los haces individuales debe tenerse cuidado de evitar armónicos que pueden alterar la detección, tal como cuando un haz tiene una frecuencia que es un múltiplo de otra. A modo de ejemplo, frecuencias adecuadas en el intervalo por encima de 100 MHz pueden ser de 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 210, 230, 250, 270, 290 MHz, etcétera. Esto permite que todos los haces funcionen de manera continua, pero todavía permite detectar haces individuales.

30 El sensor óptico de viento descrito anteriormente puede usarse en sistemas que controlan el funcionamiento de la turbina eólica, tales como sistemas de control del paso y la guiñada, así como para proporcionar datos usados en el cálculo de la curva de potencia para la turbina.

35 Además, el sensor de viento puede usarse para detectar una componente vertical de la dirección del viento. Por componente quiere decirse que la dirección del viento está vectorizada y que tiene tres componentes, siendo una paralela al eje de rotación del rotor y siendo dos perpendiculares a dicha componente, una componente de este tipo puede ser una componente esencialmente vertical, y la velocidad del viento supera un umbral predeterminado, el funcionamiento de la turbina se degrada o se detiene. Una situación de este tipo puede corresponder por ejemplo a cuando está presente un error de guiñada grave, pero en vez de estar un lado del rotor (de izquierda a derecha o de derecha a izquierda, cuando se observa en una vista frontal de la turbina) más hacia el viento que el otro, será un lado inferior o un lado superior del rotor el que esté más hacia el viento. Normalmente, la componente vertical, tal como en sitios de montaña, puede estar alejada hacia arriba del terreno y puede aumentar la carga en el lado inferior del rotor en comparación con el lado superior. Por tanto, puede estar presente una situación de carga desviada no deseada, mediante lo cual, dependiendo de las cuestiones reales específicas del sitio y la turbina, puede fijarse un umbral para degradar (reducir la salida de potencia, pero mantener la turbina operativa) o puede preferirse detener la turbina.

45 La lente y los elementos ópticos descritos en las realizaciones de ejemplo anteriores pueden ser dispositivos ópticos convencionales, u óptica holográfica o multidireccional si se prefiere.

50 Con fines de ilustración, la invención se ha descrito con referencia a varios ejemplos. La invención no debe limitarse a los mismos, y resultarán evidentes variaciones para el experto dentro de la definición proporcionada por las reivindicaciones. Por ejemplo, aunque sólo se han descrito tres palas de turbina eólica, otros números de palas son posibles. Las realizaciones de la invención también pueden adaptarse a turbinas eólicas de eje vertical cuando sea apropiado.

**REIVINDICACIONES**

1. Sensor óptico de viento de turbina eólica (10), que comprende:
  - una pluralidad de fuentes de luz (12) separadas angularmente montadas en el rotor de una turbina eólica, de tal manera que, en uso, las fuentes de luz (12) giran alrededor del eje de rotación del rotor;
  - 5 en el que cada fuente de luz (12) está colocada para emitir un haz sensor que tiene al menos una primera componente de haz direccional ortogonal al eje de rotación del rotor, y en el que cada haz sensor está constituido por al menos dos componentes de haces sensores paralelos, y en el que los haces sensores se proyectan frente a las palas del rotor, con un ángulo de entre 10 y 80 grados con respecto al plano del rotor;
  - una pluralidad de dispositivos receptores de luz (14) montados en el rotor, de tal manera que, en uso, las fuentes de luz giran alrededor del eje de rotación del rotor, y en el que la pluralidad de dispositivos receptores de luz (14) están colocados de tal manera que cada haz sensor está asociado con al menos un primer dispositivo receptor de luz respectivo (14) adaptado para detectar destellos de luz procedentes de material particulado en el viento que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores;
  - 10 un controlador (184), acoplado a la pluralidad de dispositivos receptores de luz (14), para procesar los destellos de luz detectados y determinar tiempos de tránsito para material particulado que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores respectivos, y basándose en los tiempos de tránsito detectados y una comparación de los mismos, proporcionar una indicación de la velocidad y dirección de movimiento del material particulado en el viento, a lo largo de la dirección axial y en una dirección en el plano de rotación del rotor.
- 20 2. Sensor (10) según la reivindicación 1, en el que al menos dos de los haces sensores tienen segundas componentes de haz direccionales que son paralelas al eje de rotación del rotor; y en el que el controlador (184) está configurado para:
  - determinar, a partir de destellos respectivos de los componentes de haces sensores, un tiempo de tránsito para material particulado que pasa a través de cada uno de los al menos dos haces sensores;
  - 25 comparar los tiempos de tránsito respectivos para cada haz sensor; y
  - determinar una indicación de la componente de velocidad vertical para la dirección del viento.
3. Sensor (10) según la reivindicación 2, en el que el controlador (184) está configurado para:
  - determinar si la indicación de la componente de velocidad vertical del viento está por encima de un nivel umbral, y si es así, emitir una señal de alarma.
- 30 4. Sensor según la reivindicación 2 ó 3, en el que el controlador (184) está configurado para:
  - determinar si la indicación de la componente de velocidad vertical del viento está por encima de un nivel umbral, y si es así, regular el paso de las palas de turbina eólica para reducir la presión del viento.
5. Sensor (10) según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en el que el controlador (184) está configurado para hacer funcionar un sensor de orientación (19) para determinar la orientación del buje, o de una o más de las palas, y en el que el controlador (184) registra para cada tiempo de tránsito detectado la orientación de los haces sensores en la que se detectaron los destellos.
- 35 6. Sensor (10) según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que las fuentes de luz (12) están montadas en las palas del rotor, de tal manera que el haz sensor se proyecta tanto en la dirección longitudinal de la pala como frente a la pala; y
  - 40 en el que los detectores de luz (14) están ubicados en las palas del rotor, adyacentes a fuentes de luz (12) respectivas y colocados para detectar destellos de luz procedentes de material particulado en el viento que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores.
7. Sensor según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que los haces sensores se proyectan frente a las palas del rotor, con un ángulo de entre 30 y 60 grados con respecto al plano del rotor.
- 45 8. Sensor según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 7, en el que una pluralidad de fuentes de luz (12) y detectores de luz (14) están ubicados en cada pala del rotor.
9. Sensor (10) según cualquier reivindicación anterior, en el que las fuentes de luz (12) están montadas en el buje del rotor o cerca o en el extremo de punta de la pala de una o más palas.
- 50 10. Sensor (10) según la reivindicación 9, en el que una o más de las fuentes de luz (12) y los detectores de luz (14) están montados en una barra (7) que sobresale del buje del rotor (6).

11. Sensor (10) según la reivindicación 10, en el que la barra (7) sobresale frente al buje del rotor (6), y está montada para la rotación coaxial con el eje de rotación del buje del rotor (6).
12. Sensor (10) según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en el que los al menos dos haces sensores están dispuestos en una secuencia alrededor del eje de rotación.
- 5 13. Sensor (10) según cualquier reivindicación anterior, en el que se recopilan datos que indican la componente de velocidad vertical para la dirección del viento a lo largo de un periodo de tiempo por parte del controlador y se transmiten a un operario de parque eólico.
14. Sensor (10) según cualquier reivindicación anterior, en el que los al menos dos componentes de haces sensores paralelos tienen diferentes longitudes de onda de luz uno en comparación con el otro.
- 10 15. Sensor (10) según la reivindicación 14, en el que las diferentes longitudes de onda son invisibles al ojo humano.
16. Sensor (10) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, en el que los al menos dos componentes de haces sensores paralelos tienen la misma longitud de onda, pero están dispuestos para emitir destellos con diferentes frecuencias.
- 15 17. Sensor (10) según cualquier reivindicación anterior, en el que cada fuente de luz (12) comprende una fibra óptica (161) conectada a una fuente de luz optoelectrónica (180), en el que la fuente de luz optoelectrónica (180) está alojada en una parte eléctricamente protegida de la turbina eólica.
18. Sensor (10) según cualquier reivindicación anterior, en el que el sensor de dispositivo receptor de luz (14) está conectado (162) a un detector fotoeléctrico (182) alojado en una parte eléctricamente protegida de la turbina eólica, y el dispositivo receptor de luz (14) y su acoplamiento (162) con el detector fotoeléctrico (182) no son eléctricamente sensibles.
- 20 19. Sensor según la reivindicación 17, en el que la fibra óptica (161) de cada fuente de luz (12) está unida al mismo emisor de luz optoelectrónico (180).
20. Turbina eólica que comprende un sensor según cualquier reivindicación anterior.
- 25 21. Método para hacer funcionar un sensor óptico de viento de turbina eólica (10) para determinar la velocidad y dirección del viento que llega a un rotor de turbina eólica, en el que el sensor óptico de viento comprende una pluralidad de fuentes de luz (12) y dispositivos receptores de luz (14) montados en el rotor de turbina eólica, de tal manera que, en uso, las fuentes de luz (12) y los dispositivos receptores de luz (14) giran alrededor del eje de rotación del rotor; comprendiendo el método:
- 30 emitir, desde cada fuente de luz (12), un haz sensor que tiene al menos una primera componente de haz direccional ortogonal al eje de rotación del rotor, en el que cada haz sensor está constituido por al menos dos componentes de haces sensores paralelos, y en el que los haces sensores se proyectan frente a las palas del rotor, con un ángulo de entre 10 y 80 grados con respecto al plano del rotor;
- 35 recibir, por medio de los dispositivos receptores de luz (14), destellos de luz procedentes de material particulado en el viento que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores respectivos;
- procesar los destellos de luz detectados para determinar un tiempo de tránsito para material particulado que pasa a través de los al menos dos componentes de haces sensores respectivos; y
- 40 basándose en los tiempos de tránsito detectados, determinar la velocidad y dirección de movimiento del material particulado en el viento, a lo largo de la dirección axial y en una dirección en el plano de rotación del rotor.
22. Método para hacer funcionar un sensor óptico de viento de turbina eólica (10) para determinar la velocidad y dirección del viento que llega a un rotor de turbina eólica según la reivindicación 21, en el que, cuando se detecta una componente de dirección del viento vertical y la velocidad del viento supera un umbral predeterminado, se degrada o se detiene el funcionamiento de la turbina.
- 45 23. Medio legible por ordenador no transitorio que tiene código informático almacenado en el mismo, que, cuando se ejecuta en un procesador, hace que el procesador realice las etapas de las reivindicaciones de método 21 ó 22.

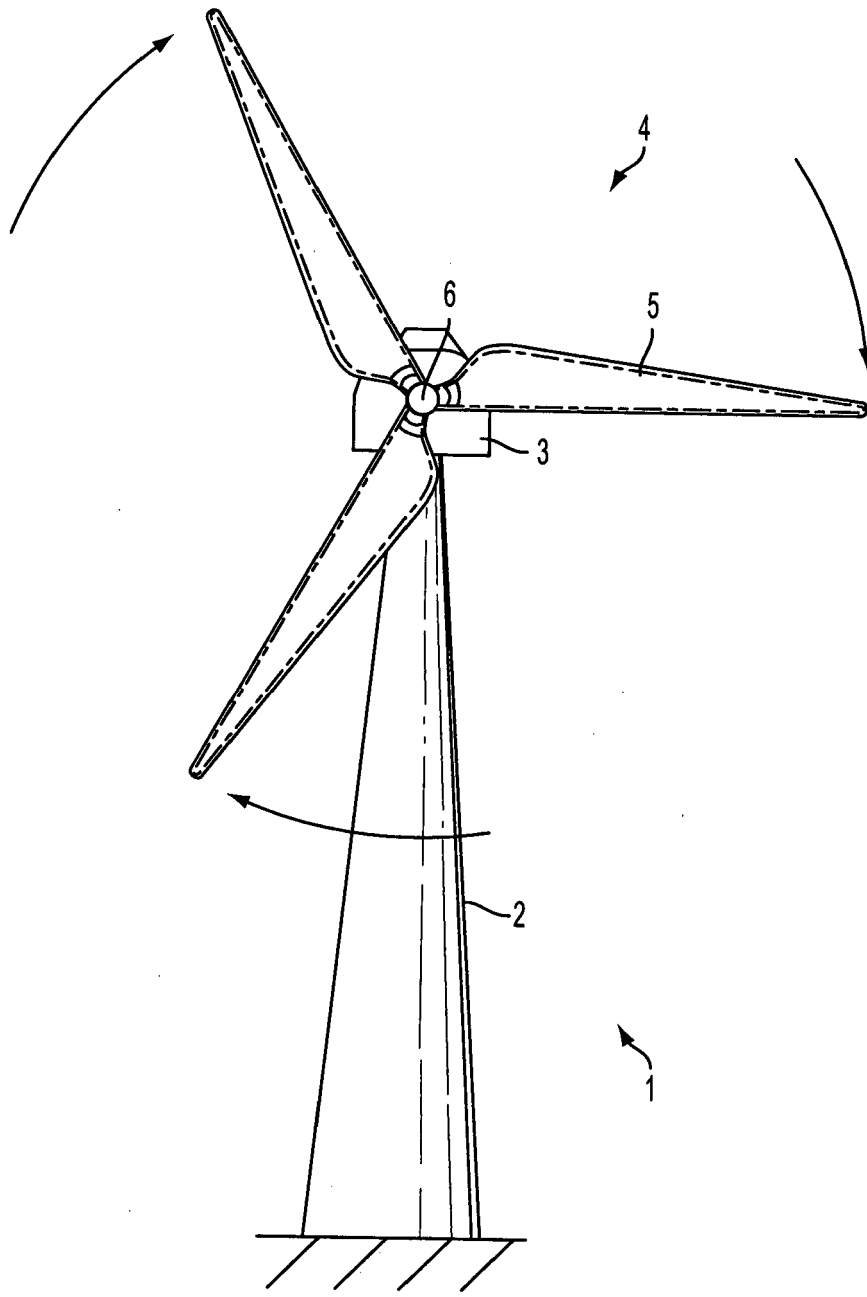


FIG. 1

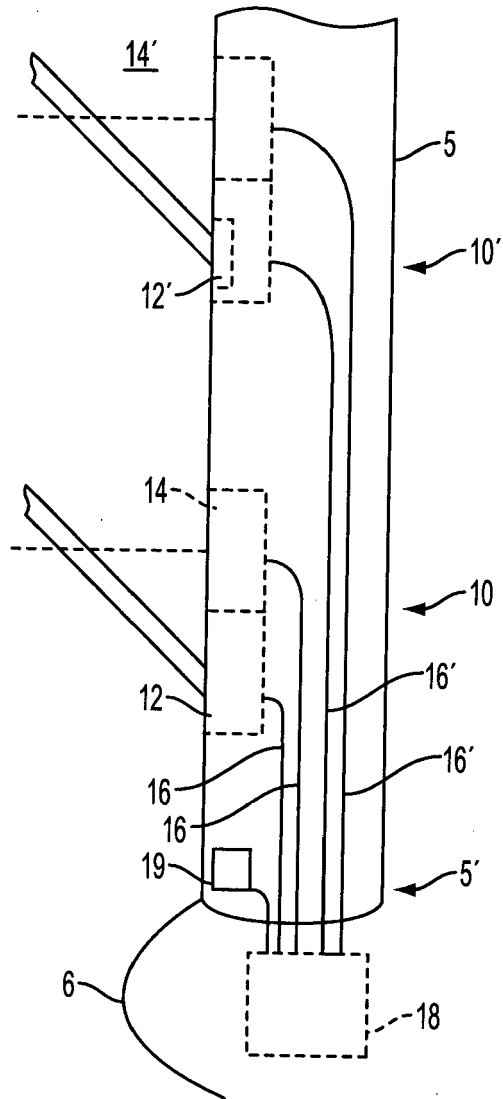


FIG. 2

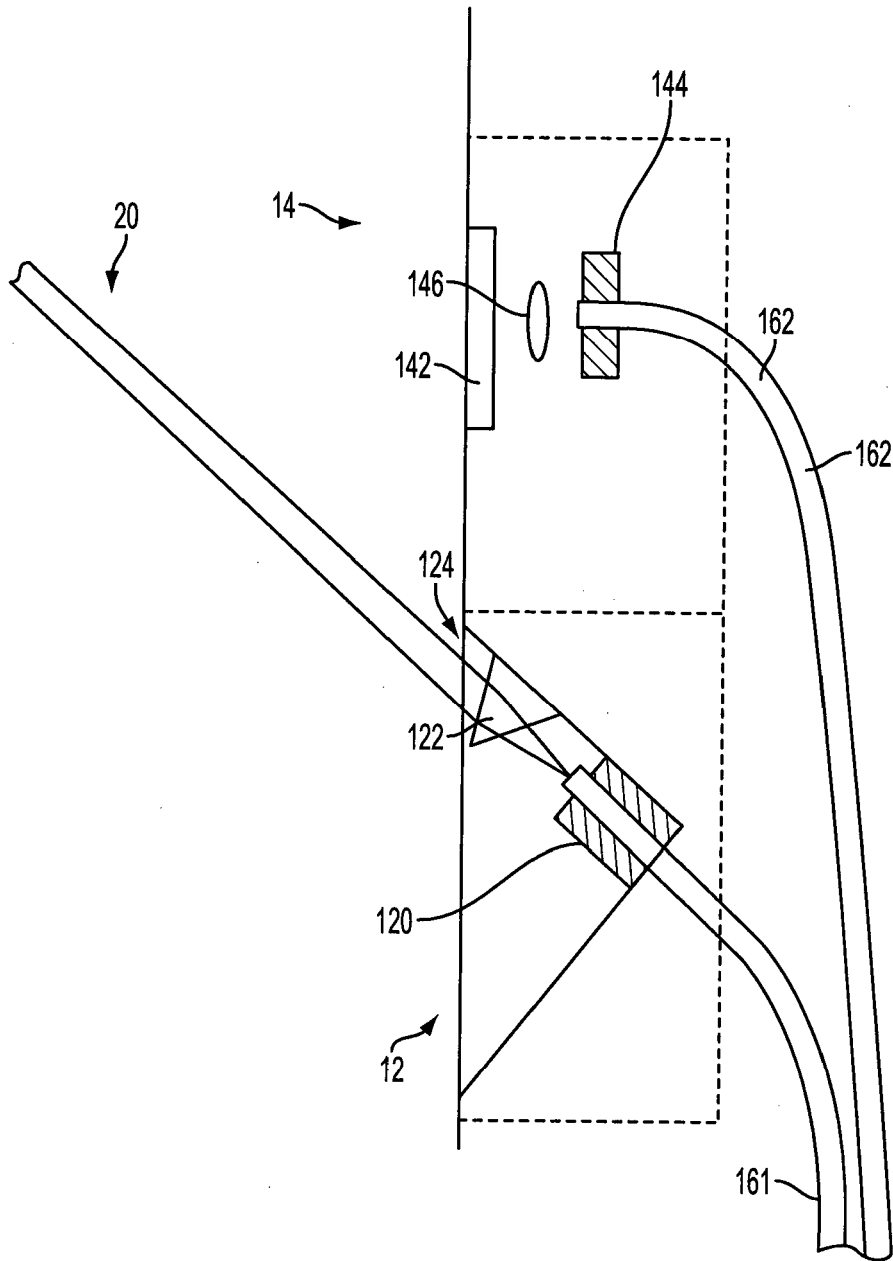


FIG. 3



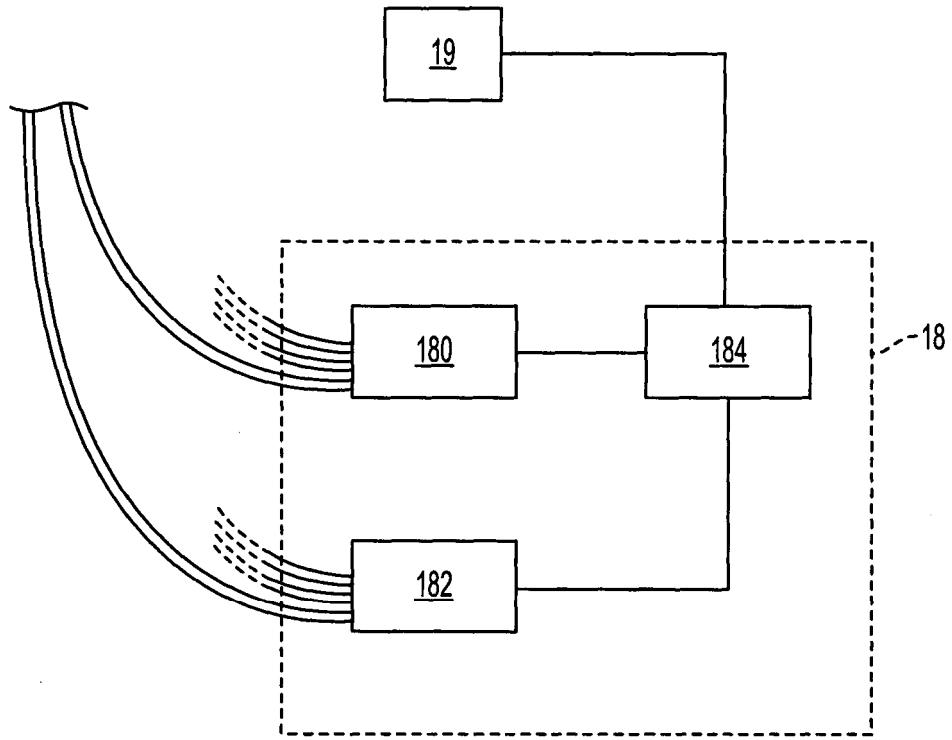


FIG. 4

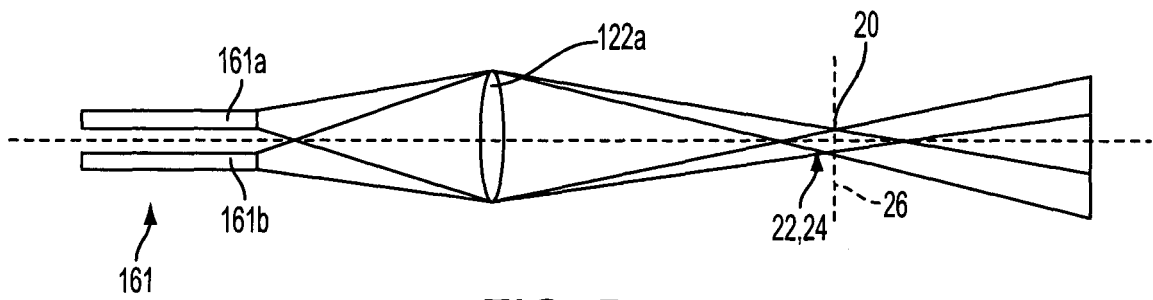


FIG. 5

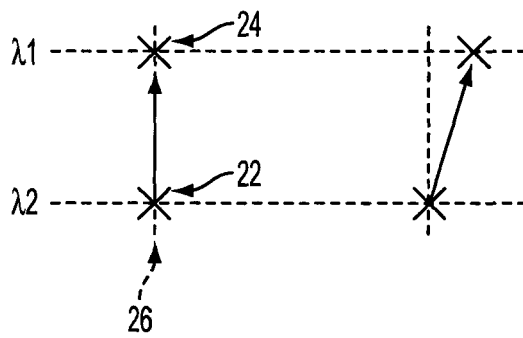


FIG. 6

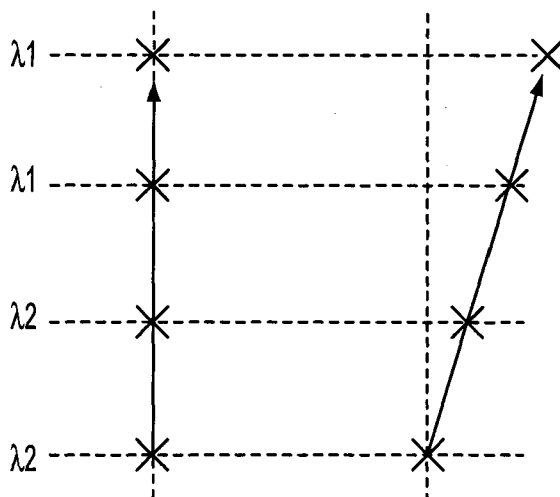


FIG. 7

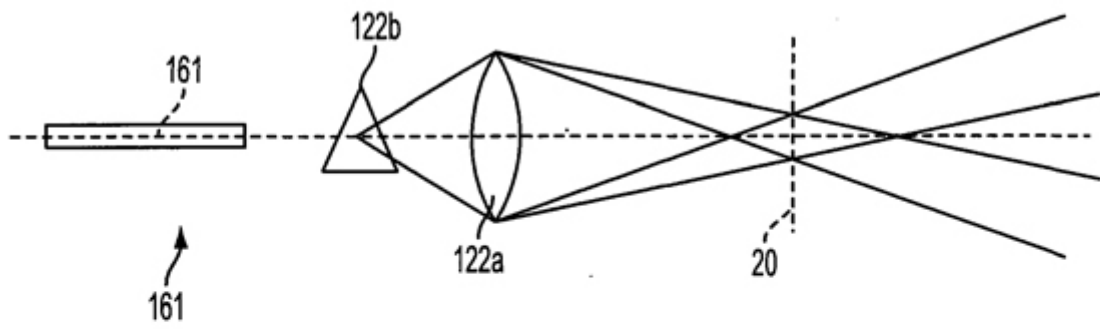


FIG. 8

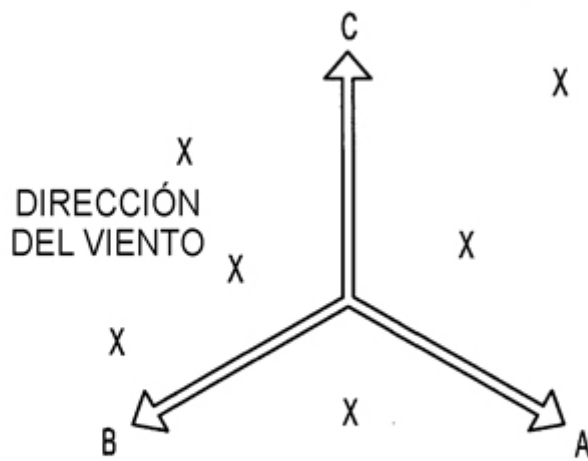


FIG. 9

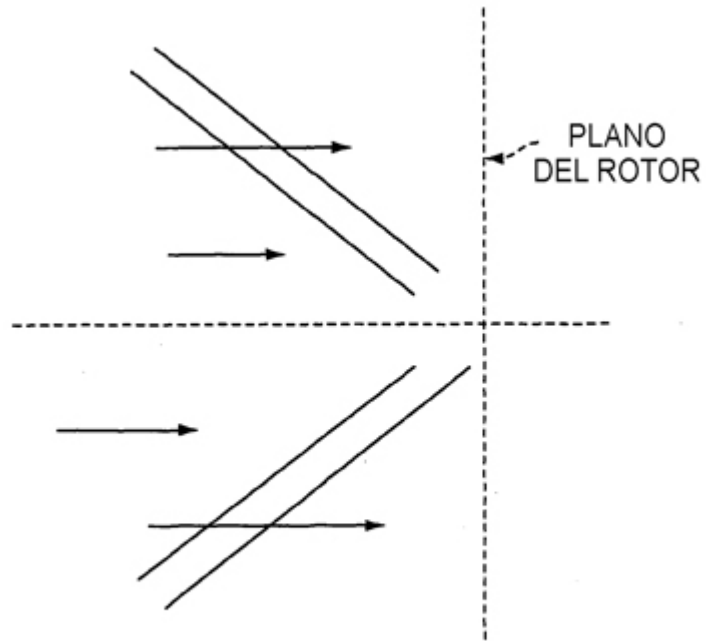


FIG. 10A

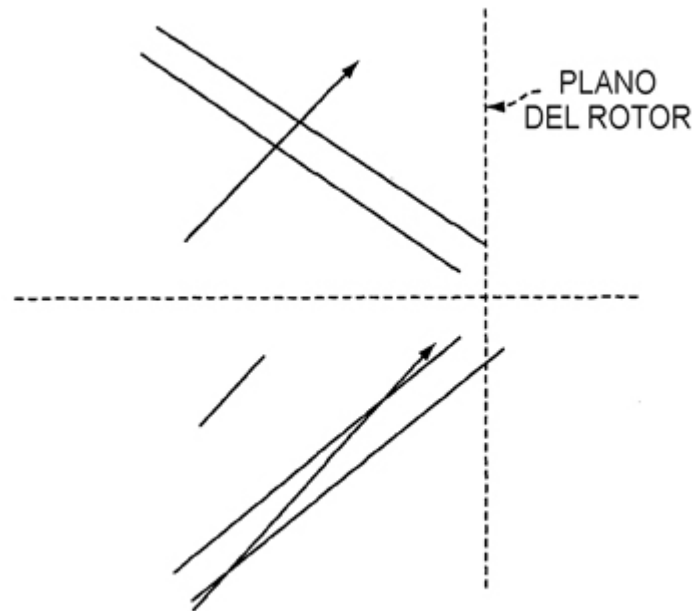


FIG. 10B



FIG. 11A

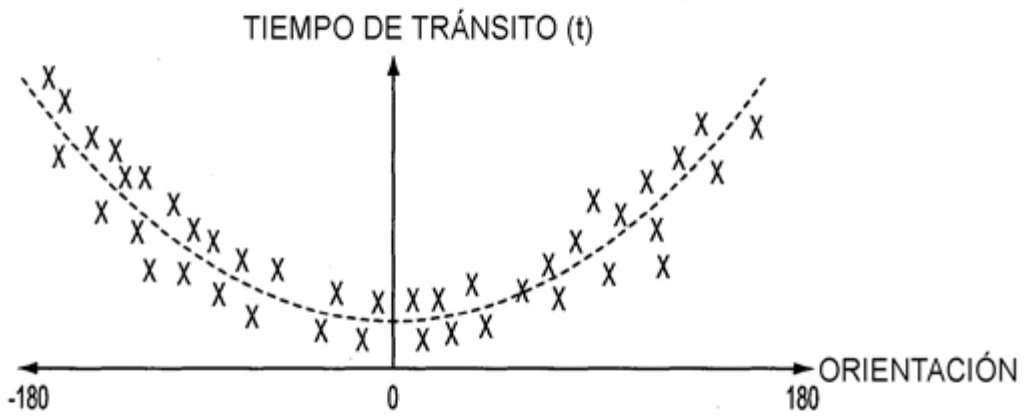


FIG. 11B

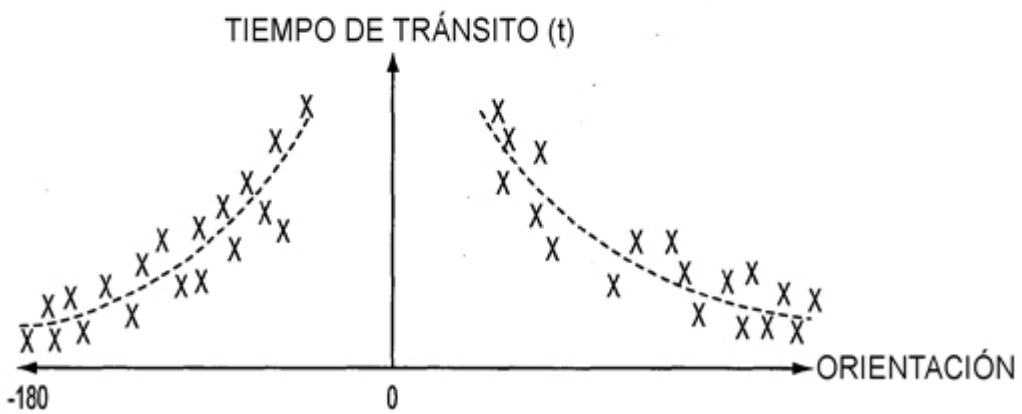


FIG. 11C

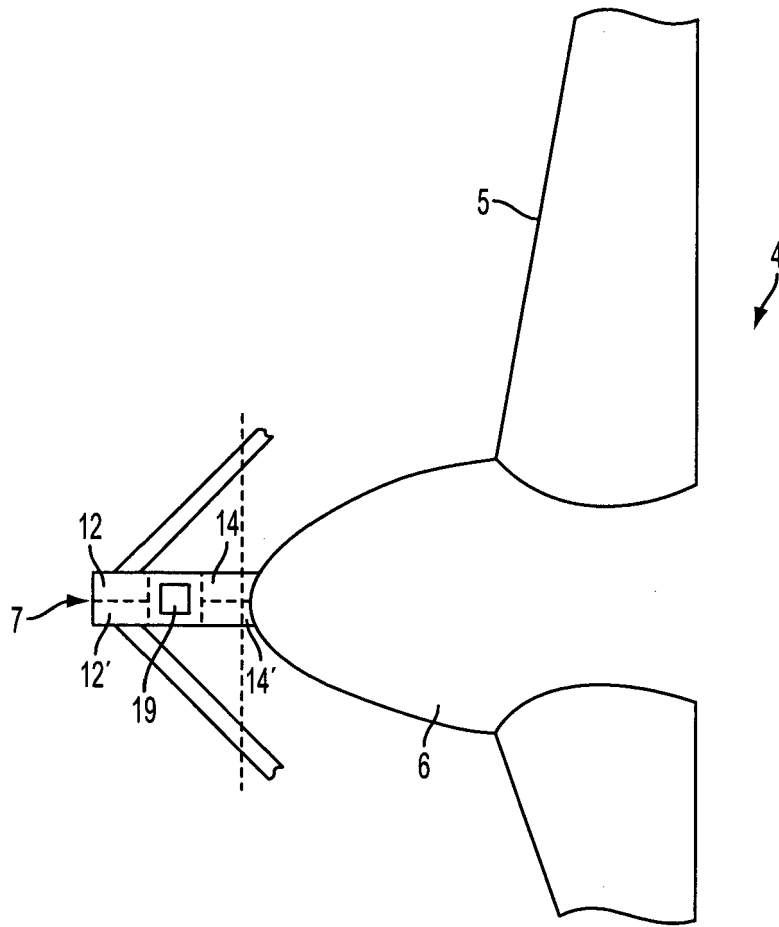


FIG. 12

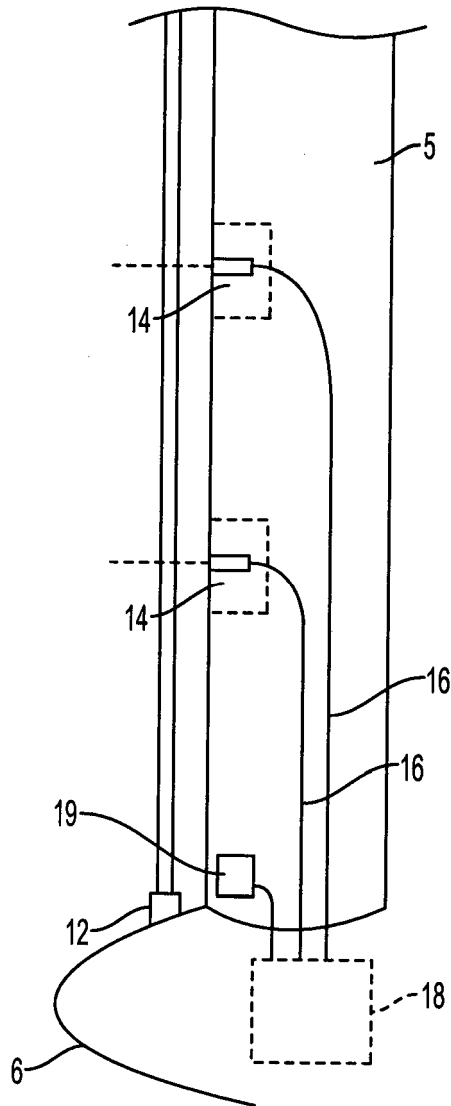


FIG. 13