(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 668 546**

(51) Int. Cl.:

F03D 13/00 (2006.01)
G01N 25/72 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.03.2014** **PCT/US2014/030328**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **18.09.2014** **WO14145537**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.03.2014** **E 14722894 (4)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.02.2018** **EP 2984341**

(54) Título: **Sistema y método para inspección basada en suelo de palas de turbina eólica**

(30) Prioridad:

15.03.2013 US 201313839908

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.05.2018

(73) Titular/es:

DIGITAL WIND SYSTEMS, INC. (100.0%)
One Tower Bridge Suite 900
West Conshohocken, PA 19428, US

(72) Inventor/es:

NEWMAN, JOHN, W.

(74) Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 668 546 T3

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

DESCRIPCIÓN

Sistema y método para inspección basada en suelo de palas de turbina eólica

Antecedentes de la invención

1. Campo de la invención

La invención describe método y aparato para inspeccionar desde el suelo palas de turbina eólica de generadores de turbina eólica en rotación. La invención tiene utilidad para la detección remota de defectos latentes que se propagan, desperfectos existentes y uniones adhesivas rotas dentro de la cubierta de una pala de turbina eólica. Esto permite detectar defectos infrasuperficiales antes de que se hagan demasiado grandes para ser reparados *in situ*, lo que proporciona ventajas económicas significativas, ya que el coste de reparar una pala de turbina eólica *in situ* asciende típicamente a 10% del coste de reemplazar la pala.

2. Descripción de la tecnología relacionada

Por su considerable tamaño, gran área superficial y forma compleja, las palas de turbina eólica son difíciles de inspeccionar de manera no destructiva incluso dentro de unas instalaciones de fabricación o reparación. La inspección visual no puede identificar defectos bajo la superficie de la cubierta externa de la pala de turbina eólica, que típicamente está fabricada de un material de fibra de vidrio. Las técnicas de inspección mediante termografía activa son eficaces para defectos cercanos a la superficie, pero pueden dar falsos positivos y falsos negativos a causa de variaciones en el grosor del material y la emisividad superficial. Las técnicas ultrasónicas con haz angular son muy lentas y es posible que no funcionen a través de tapas de larguero gruesas de fibra de carbono. En consecuencia, corrientemente se instalan y se ponen en servicio en las torres palas con una probabilidad significativa de defectos de fabricación latentes. Además, las palas de material compuesto están sujetas a variaciones extremas de temperatura. El agua atrapada en las palas puede experimentar ciclos de congelación/descongelación, que pueden originar daños internos. Las fuerzas de gravedad cíclicas y las fuerzas variables del viento que actúan sobre las palas a medida que giran pueden originar daños por fatiga o bien la propagación con el transcurso del tiempo de defectos latentes, mientras que errores en el proceso de fabricación pueden conducir a un fallo prematuro de la pala. Pueden crecer defectos bajo la superficie de una pala de turbina eólica hasta el punto de que, cuando las grietas y los fallos emergen a la superficie y pueden ser detectados visualmente, es posible que el deterioro ya no sea reparable en la torre.

La detección *in situ* de daños infrasuperficiales progresivos y de defectos en propagación, en palas de turbinas eólicas, es difícil por diversas razones. La intervención de inspectores que acceden mediante grúas telescópicas o cuerdas de escalada es costosa, requiere mucho tiempo y expone al personal a un entorno de trabajo muy peligroso. Mientras están en la torre, el acceso cercano permite a los inspectores detectar visualmente defectos en la pala tales como grietas en el borde de salida, grietas, daños debidos al rayo y erosión de la pala. Además, deslaminaciones infrasuperficiales de importancia, grietas, despegaduras de uniones adhesivas pueden pasar fácilmente desapercibidas con la tecnología actual.

El acceso *in situ* a una pala de turbina eólica con instrumentos portátiles para ensayos no destructivos también requiere acceso mediante cuerdas de escalada o plataformas aéreas y grúas. También se han desarrollado y probado aparatos que trepan por las palas y la torre, provistos de sensores para ensayos no destructivos, concebidos para la inspección *in* situ, pero pueden tener un coste prohibitivo, ser de funcionamiento lento y requerir a su vez reparaciones y mantenimiento. Su efectividad también es cuestionable. Los escáneres de microondas y de radar, aunque son eficaces para materiales dieléctricos, no funcionan en componentes críticos, por ejemplo tapas de larguero, fabricados con materiales que tienen fibra de carbono, que es eléctricamente conductora.

Por consiguiente, existe la necesidad de un sistema y método rápidos y rentables para inspección no destructiva de palas de turbina eólica, que detecten daños latentes y en propagación lo suficientemente temprano como para permitir su reparación en la torre antes de que sea necesario desmontar de la torre la pala de turbina eólica y repararla en otro lugar o sustituirla por una nueva pala. En los documentos EP 2 527 649, US 2010/0103260 y en "Thermographic Inspection of Rotor Blades" (Inspección termográfica de palas de rotor) (2006) por Meinlschmidt y Aderhold, se ofrecen, de manera ilustrativa, algunos ejemplos del uso de la obtención *in situ* de termografías para detectar daños en palas de rotor.

Compendio de la invención

En consecuencia, es un objeto de la invención proporcionar un sistema y método rápidos y rentables para inspección no destructiva de palas de turbina eólica, destinados a detectar daños latentes y en propagación lo suficientemente temprano como para permitir su reparación en la torre antes de que sea necesario desmontar de la torre la pala de turbina eólica y repararla en otro lugar o sustituirla por una nueva pala.

Conforme a la realización, se describe en la presente memoria un sistema para inspeccionar desde el suelo, durante el funcionamiento normal, palas de generador de turbina eólica de escala comercial, en busca de anomalías infrasuperficiales en propagación, compuesto por una cámara sensible a las emisiones térmicas procedentes de

defectos sometidos a tensión cíclica por la gravedad y cargas de viento, y un medio para procesar termografías de estas emisiones con el fin de determinar su localización, relación señal/ruido, tamaño u otras medidas cuantitativas, y que dicha detección temprana pueda permitir la reparación de la pala en la torre en lugar de una sustitución más costosa.

Una segunda realización incluye un medio para estabilizar las termografías de una pala de turbina eólica a lo largo de al menos varios fotogramas sucesivos de vídeo, para reducir los efectos de degradación de la imagen por el movimiento de la pala.

Una tercera realización incluye un medio para estabilizar la cámara cuando se realizan inspecciones de turbinas eólicas marinas desde una embarcación.

Estas y otras varias ventajas y características de novedad que caracterizan la invención se señalan de manera particularizada en las reivindicaciones adjuntas a la presente memoria y que forman parte de la misma. Sin embargo, para una mejor comprensión de la invención, sus ventajas y los objetos logrados mediante su uso, se debe hacer referencia a los dibujos que forman una parte adicional de la presente memoria, y a la materia descriptiva aneja, en la que se ilustra y se describe una realización preferida de la invención.

Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es una representación esquemática de un generador de turbina eólica de eje horizontal, de escala comercial.

La Figura 2 es una representación esquemática de una sección transversal de pala de turbina eólica.

La Figura 3 es un esquema que muestra la posición relativa de la cámara térmica para inspección de palas de turbina eólica orientadas de manera aproximadamente paralela al suelo o a la superficie del mar.

La Figura 4 muestra una vista en planta de un emplazamiento de turbina eólica con seis posiciones para que la cámara térmica capte diversos puntos de las palas.

La Figura 5 muestra una configuración básica de obtención de termografías adecuada para visualizar directamente y grabar superficies de pala en el disco de palas de turbina o cerca del mismo.

La Figura 6 es un esquema que muestra la cámara térmica captando un lado de baja presión, o de succión, de una pala en posición horizontal.

La Figura 7 muestra cómo una unidad electrónica de imagen de registro de pico capta la trayectoria de defectos con emisión térmica a medida que la pala atraviesa el campo de visión de la cámara térmica.

La Figura 8 es un diagrama esquemático de un conjunto de espejo móvil controlado manualmente, montado delante de la cámara térmica, destinado a estabilizar termografías, o cancelar la rotación en las mismas, de una pala de turbina giratoria y adecuado para el uso cuando la pala tiene una orientación aproximadamente horizontal.

La Figura 9 es un esquema de estabilizador de imagen de cámara en movimiento, controlado por ordenador, para cancelar la rotación en una secuencia de termografías de una pala de turbina giratoria, que utiliza la presencia de la pala en la imagen de vídeo para activar el inicio del seguimiento de la pala.

La Figura 10 muestra la secuencia temporal de la forma de onda de la tensión en rampa utilizada para accionar el motor lineal que impulsa la placa articulada que sostiene la cámara térmica, con el fin de seguir una única pala que gira con un período de cuatro segundos.

La Figura 11 es un diagrama esquemático de una cámara térmica montada sobre cardán, para realizar desde una embarcación para ensayos en palas de turbina eólica marina.

La Figura 12 es un diagrama esquemático de una cámara térmica que realiza ensayos de una pala con una cámara de luz visible y una fuente de luz destinados a obtener imágenes del número de serie de la pala y mostrar la imagen del número de serie acompañando a las imágenes del ensayo de la pala.

La Figura 13 es una representación fotográfica de fotogramas de imagen que muestran ensayos realizados según una realización de la invención.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Las realizaciones de la presente invención descrita en la presente memoria describen un sistema y método para la inspección no destructiva de palas de turbina eólica, adecuados para generadores de energía eólica tanto terrestres como marinos, y capaces de detectar defectos que se propagan o daños durante el funcionamiento normal de la turbina. Las inspecciones se realizan desde el suelo o desde la superficie del mar sin ninguna necesidad de acceso a la torre del generador eólico ni interrupción de la generación de energía. Las grandes turbinas de energía eólica de

escala comercial corresponden generalmente al diseño HAWT, que utiliza palas de material compuesto con forma de superficie sustentadora para generar el torque de rotación necesario para impulsar el generador eléctrico. Las palas de turbina eólica de escala comercial actuales pueden tener una longitud que va desde 9 m hasta más de 50 m, diseñándose palas mucho más grandes para generadores de energía eólica marinos. La aplicación de esta invención puede lograr buenos resultados en palas de cualquier longitud fabricadas con materiales compuestos termoelásticos tales como fibra de vidrio y fibras de carbono en una matriz epoxi.

Durante el funcionamiento normal, las palas de turbina eólica están sometidas a cargas cíclicas continuas a causa de la gravedad y fuerzas variables debidas al viento. La obtención de termografías de defectos de la pala requiere que la prueba se realice tras la puesta del sol o en días nublados, durante el funcionamiento normal. Una vez que las palas han alcanzado el equilibrio térmico con la temperatura del aire ambiente, las únicas emisiones térmicas procedentes de la pala que restan se generan en el sitio del defecto en propagación, en cualquier punto de la pala. Se pueden producir daños tribológicos, entre ellos deformación plástica, frotamiento, desgaste adhesivo, oxidación y transformaciones de fase, por ejemplo fusión, en caras de la fisura que se rozan, C.J. Pye *et al.* (Ref. 1), donde cargas gravitacionales cíclicas pasan a través de anomalías estructurales. El calor es generado por tres mecanismos (J. Renshaw, Ref. 2), rozamiento por fricción interna de superficies en contacto (asperezas) de las paredes de la fisura, deformación de la zona plástica que rodea la fisura y pérdidas viscoelásticas.

Aunque la anomalía local de la temperatura superficial de la pala es pequeña y el área puede ser reducida, la presente invención proporciona una excelente relación señal/ruido y datos cuantitativos para evaluar el estado de las palas. Son necesarias ópticas de teleobjetivo para resolver el pequeño ángulo α subtendido, por ejemplo, por una fisura de 15 cm (6 pulgadas) de largo a 91 m (300 pies) de altura, donde α = arcoseno 1/600 = 0,0955°, es decir, solo 343 segundos de arco. Además, si el defecto se encuentra cerca de la punta de la pala, la señal térmica se estará moviendo a gran velocidad. Por ejemplo, en una pala 50M típica, funcionando a 20 r.p.m., la señal térmica se estará moviendo a 53,9 m/s (176,8 pies/s).

Dependiendo de las características de la cámara térmica, que habitualmente utiliza un sensor térmico microbolométrico relativamente lento, la rotación de la pala a través del campo de visión de una cámara térmica típica hace que sea difícil para un técnico ver, y mucho menos analizar, las señales térmicas, incluso aunque la cámara tenga las prestaciones de resolución térmica requeridas para detectar las emisiones. La colocación de la cámara térmica en el lado derecho de la torre (en el suelo o al nivel de la superficie del mar para una turbina marina, de espaldas al viento) en un punto aproximadamente a la mitad del recorrido debajo del disco del rotor de la turbina (el plano que contiene las puntas de las palas) permite que la cámara obtenga imágenes de los bordes de ataque de las palas de turbina, ya que se mueven directamente hacia la cámara, con un ángulo de pala que cambia de manera relativamente lenta. Se pueden obtener buenos resultados para defectos en los bordes de ataque de la pala. Los bordes de salida pueden inspeccionarse de la misma manera desde el lado izquierdo de la torre (con viento desde atrás), donde las palas se mueven directamente alejándose de la cámara. El obtener imágenes de un defecto que se encuentra en otro lugar de las palas es más difícil, ya que las palas se ven a barlovento o a sotavento del disco de la turbina y la imagen se mueve rápidamente a través del campo de visión de la cámara.

Las termografías de las palas giratorias desde posiciones a barlovento o a sotavento del plano del disco de la turbina se pueden captar con la cámara térmica y utilizando la memoria de la cámara, si está presente, o un ordenador con los controladores adecuados para captar imágenes digitales utilizando una interfaz GigE o de enlace con cámara o bien un capturador de fotogramas de vídeo analógico a digital o cualquier otra interfaz cámara/ordenador apropiada, bien conocida en la técnica. Un algoritmo de *software* para visualizar fotograma a fotograma una serie de imágenes secuenciadas permite identificar defectos a medida que la pala gira a la vista de la cámara. Parte de esta invención también incluye una función de imagen de registro de pico que registra el valor máximo almacenado para cada píxel en cada fotograma. Cuando un punto caliente de la pala, causado por fricción interna inducida por esfuerzo en el sitio de un defecto en propagación, plasticidad o emisiones termoelásticas, gira a la vista, se bloquea cada píxel en su valor máximo. Con una serie de fotogramas secuenciales combinados en una imagen de registro de pico, se registran en cada paso de pala las trayectorias de movimiento de las señales de defecto. Dado que las palas de turbina eólica están pintadas para reflejar el calor del sol, el calor procedente de fuentes distintas a los defectos activos de la pala puede aparecer como reflejos en las termografías de las palas. Un ejemplo lo podría constituir el calor de un automóvil situado cerca de la torre eólica. La señal térmica de un defecto formará una trayectoria de onda sinusoidal alrededor de la trayectoria de la pala, mientras que la reflexión procedente de fuentes de calor en el suelo o en torres adyacentes aparecerá "pintada" sobre la imagen de la pala en un pequeño número de fotogramas o con un ángulo pequeño de rotación de la pala.

En múltiples realizaciones de esta invención se puede añadir a la abertura frontal de la cámara térmica un dispositivo de estabilización por cancelación de la rotación de la imagen de la pala, con el fin de cancelar la rotación del movimiento de la pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara.

Un movimiento de espejo de dos ejes con dos accionadores permitiría una compensación más precisa del movimiento de la imagen, ya que la pala se ve desde una distancia que va desde 30,5 m (100 pies) hasta 305 m (1000 pies), a menudo con una vista considerablemente desplazada del eje. En sí, el movimiento de la pala y el movimiento de cualquier emisor térmico en la superficie de la pala parecen moverse con un movimiento combinado vertical y horizontal que se asemeja a una onda sinusoidal. La inspección de las palas es mejor cuando se

encuentran dentro de aproximadamente 45 grados de la posición horizontal de 90 y 270 grados, de modo que las imágenes en toda la amplitud de la pala tienen aproximadamente la misma escala.

Se puede utilizar la señal de salida de un generador de funciones que produce una función en rampa para impulsar un accionador lineal de bobina móvil con una amplitud y una tasa de repetición necesarias para detener la apariencia de movimiento de varios fotogramas de vídeo. Cuando la pala comienza a pasar a través del campo de visión se inicia el movimiento de pivote del espejo, y persigue la imagen de la pala a través del campo de visión. Se pueden establecer la frecuencia y la amplitud con un ciclo que corresponde al período de rotación de la turbina de τ segundos, para seguir una pala, o de τ/3 para seguir las tres palas secuencialmente. Otras realizaciones incluyen el uso de la diana gráfica generada por software que se coloca en la imagen de vídeo procedente de la cámara térmica y que activa el cancelador de la rotación con el fin de iniciar un ciclo de movimiento del espejo. Cuando la pala entra en el campo de visión de la cámara térmica y cruza la diana gráfica en el visualizador, el ordenador comienza a desplazar el espejo para seguir aproximadamente la pala durante el mayor tiempo posible, lo que da tiempo a la cámara térmica para captar múltiples imágenes de alta calidad. El movimiento del cancelador de la rotación también puede ser activado por un fotodetector dispuesto para detectar la luz de un haz láser que ilumine la pala desde el suelo. Un láser de baja potencia no expandido y sistemas electrónicos de detección proporcionarían una señal electrónica de activación cuando la pala estuviera en la posición correcta para iniciar el seguimiento.

En otra realización, se puede montar una cámara térmica de poco peso en una placa articulada y se puede hacer que trabaje con cualquiera de los métodos para cancelar la rotación de la imagen de la pala giratoria, como se describe en la presente memoria.

Haciendo referencia ahora a los dibujos, en donde números de referencia similares designan estructuras correspondientes en todas las vistas, y haciendo referencia en particular a la Figura **1,** se trata de un diagrama esquemático de un HAWT que es típico de generadores de turbina tanto terrestres como marinos. La vista **1** desde detrás de la turbina orientada hacia el viento incluye una torre **6** que se levanta desde el suelo o desde la superficie **28** del mar para soportar la góndola **8** que contiene el generador y engranajes reductores, salvo que se trate de un generador de accionamiento directo. En una turbina eólica de escala comercial existen típicamente tres palas, **11**, que tienen extremos **10** de encastre y puntas **12** de pala. Como se ve en la vista lateral **3,** los extremos de encastre de las palas se unen al cubo giratorio **18.** Al lado **16** de la pala enfrentado al viento **4** se le denomina a menudo lado de alta presión. Al lado **14** de la pala que se aleja del viento se le denomina lado de baja presión o de succión. A medida que aumenta la velocidad **17** de la pala, se ajusta el paso de la pala al ángulo de ataque óptimo con respecto al viento **4**, con el fin de crear la sustentación y par máximos requeridos para accionar el generador eléctrico.

La Figura **2** muestra la sección transversal constructiva de una pala HAWT típica. Las palas de turbina eólica se construyen generalmente con carcasas de material compuesto unidas por adhesión, que forman el lado **16** de alta presión y el lado **14** de baja presión**.** El borde **21** de salida está formado por las carcasas **14** y **16** unidas por adhesión, lo mismo que el borde **20** de ataque, con unión adhesiva en algunos casos entre dos pestañas **22** formadas por las cubiertas internas y externas de fibra de vidrio que constituyen paneles **18** en emparedado. Están unidas a los bordes de los paneles **18** en emparedado dos tapas **26** de larguero**,** que pueden estar hechas de fibra de vidrio o de estratificado de fibra de carbono u otro material compuesto**.** El alma **30** de larguero de la pala**,** que puede ser un estratificado sólido de fibra de vidrio o una construcción en emparedado con láminas externas de fibra de vidrio o de carbono y un material central hecho de espuma, madera de balsa u otro material adecuado con alta resistencia a la compresión. El alma **30** de larguero está unida con adhesivo **28** a las tapas **26** de larguero para formar una viga en I. A veces está presente una segunda o incluso una tercera alma de larguero, formando una viga de cajón. Defectos tales como despegaduras del adhesivo o faltas de unión, existentes en la unión adhesiva **28** de la tapa **26** de larguero con el alma **30** de larguero, pueden conducir a una falla catastrófica de la pala durante el servicio. Las ondulaciones de la fibra en el estratificado sólido de la tapa **26** de larguero pueden conducir también a un agrietamiento de la pala y finalmente al fallo de la misma. Además, despegaduras en el borde **21** de salida o grietas en la unión adhesiva **24** de la carcasa en el lado **16** de alta presión y el lado **14** de baja presión pueden ser signos de una flexión excesiva de la pala durante su funcionamiento. La unión adhesiva **24** del borde **21** de salida**,** en la zona de mayor anchura de la cuerda de la pala hacia el extremo **10** de encastre, soporta cargas de torsión de la pala. Grietas y roturas de la unión adhesiva **24** en estas posiciones pueden conducir también al fallo de la pala, a menos que se detecten a tiempo y se detenga y se repare rápidamente la turbina.

La Figura **3** es un diagrama esquemático que muestra la vista lateral de la cámara térmica **222** en emplazamientos a sotavento de la torre **6,** con el fin de inspeccionar el lado de baja presión de la pala **11.** La cámara térmica **222** detecta emisiones térmicas **204** procedentes de defectos en la pala **11** que se propagan a causa de cargas cíclicas de esfuerzo originadas por la gravedad y fluctuaciones del viento**.** La vista lateral también muestra el plano **20** como una línea que se extiende hasta el suelo o la superficie **28** del mar**,** que contiene las puntas **12** de las palas**.** Esta posición aproximada es un buen punto de vista para inspeccionar el borde **20** de ataque de la pala **11.**

La Figura **4** muestra la cámara térmica **222,** colocada tanto en posiciones en el lado de barlovento, de alta presión, de las palas de turbina, en dos emplazamientos a ambos lados de la torre en el plano del disco de las palas, como en una posición en el lado de sotavento, de baja presión o de succión, de las palas, con el fin de proporcionar una visión ventajosa de todas las superficies de la pala durante la rotación. El mejor ángulo de visión del lado **14** de baja

presión de las palas **11** se consigue con la cámara térmica **222** situada aproximadamente en la posición **212,** pero los mejores resultados se obtienen empleando un estabilizador de imagen como se describe en la presente memoria o bien una unidad o software de imagen de registro de pico, debido a la velocidad relativamente alta con que la imagen de la pala atraviesa el campo de visión de la cámara. La mejor vista de los bordes **20** de ataque de la pala se encuentra en la posición **214,** en el plano **20** de las puntas de la pala, ya que la pala **11** gira directamente hacia abajo en dirección a la cámara y los ángulos de los puntos del borde **20** de ataque cambian de manera relativamente lenta. El trasladarse a sotavento desde la posición **214** proporciona buenas vistas de las superficies frontales **14** del lado de baja presión de la pala **11,** con una velocidad relativamente baja de cambio del ángulo a lo largo de tres o cuatro fotogramas de vídeo. La posición **216** es excelente para el borde **21** de salida de las palas, y la posición **220** ofrece una vista completa del lado **16** de alta presión de la pala **11,** que se ve mejor con el estabilizador de imagen o la realización con registro de pico descrita en la presente memoria. La posición **210** ofrece vistas relativamente malas del lado de baja presión excepto para el borde **21** de salida y la estructura **18** en emparedado de baja presión posterior**,** pero con cambios de ángulo en movimiento rápido y con torsión de la pala. Los parques de turbinas eólicas están emplazados a menudo en colinas o crestas montañosas con poco espacio para alejarse de la torre.**6.** Las condiciones locales y la configuración del terreno determinan frecuentemente dónde se pueden obtener los mejores ángulos de visión.

La Figura **5** es un diagrama esquemático que muestra una cámara térmica **222,** situada para recibir radiación térmica **228** de bajo nivel procedente de la pala **11** debida a la emisión termoelástica originada por las tensiones que actúan sobre el material de la pala a causa de fuerzas gravitacionales derivadas del movimiento **17** de rotación de la pala**.**

La emisión **226** procedente del defecto **224** sometido a esfuerzo mecánico aparece más caliente, a causa de la fricción interna y la plasticidad en torno al defecto **224,** en la imagen producida por la cámara térmica **222.**

La cámara **222** está situada debajo de la pala en la posición **214** para recibir radiación térmica **228** procedente del borde de ataque y de la parte delantera del lado **14** de baja presión**.** Esta posición reduce los cambios angulares debidos a la rotación de la pala en la imagen durante la adquisición del fotograma. Las imágenes de vídeo transmitidas desde la cámara térmica **222** son grabadas por el ordenador **230** de procesamiento de imágenes o en un dispositivo de memoria de la cámara térmica **222** en forma de archivos de vídeo, y son procesadas mediante registro de pico u otras técnicas de procesamiento de imágenes y presentadas en el monitor **232.** Distintos medios de procesamiento de las imágenes incluyen el registro de pico de imagen de vídeo, análisis fotograma por fotograma, normalización de histogramas, filtros de desenfoque, etc., para obtener una buena calidad de imagen y mediciones cuantitativas de tamaño y situación por comparación de elementos de tamaño conocido a la distancia del blanco.

La Figura **6** muestra cómo se puede utilizar una cámara térmica situada en la posición **212** para ensayar toda la pala desde un emplazamiento, apuntando a una sección intraborda de la pala adyacente a la góndola **8** del generador y adquiriendo las secuencias termográficas. Se mueve la cámara en un arco extraborda **230** y se superpone la siguiente sección de pala y así sucesivamente hasta que se llega a la punta. El uso de un servomotor programado u otro accionamiento motorizado para mover la cámara permitiría realizar un ensayo automático rápido.

La Figura **7** muestra una representación de la función de vídeo de registro de pico. Como se ve, los defectos **236, 238** y **240** de la pala **11,** que presentan emisión térmica, giran en sentido antihorario en esta vista del lado **14** de baja presión de la pala **11,** visto desde sotavento de la torre **6.** El eje **7** de rotación está representado aproximadamente en el centro de la góndola **8.** El mayor defecto con emisión térmica, **236,** resulta ser el defecto más cercano al eje **7,** y genera la señal más intensa **248.** En una imagen de registro de pico, cada píxel queda bloqueado en el valor máximo de nivel de gris durante el tiempo de adquisición de los datos de imagen mediante el *software* de análisis posterior al ensayo, o bien sobre el terreno durante el ensayo. El resultado es que se puede seguir el rastro de las fuentes de emisiones térmicas a través del campo de visión tal como se aprecia en las trazas **248, 246** y **244** de los defectos, y como se muestra en la Figura **13**. Un defecto con emisión térmica tiene una trayectoria que sigue a la pala en rotación, vista en buena medida fuera del eje. Un barrido lineal **252** a través de la imagen **242** de registro de pico cartografía el valor de nivel de gris para cada píxel en una línea de un lado a otro de la imagen y permite dibujar una gráfica **254** que indica la intensidad de la señal de nivel de gris frente a la posición en la pala. Se calibra mediante *software* la escala de distancia, a partir del tamaño de elementos conocidos de la góndola **8** o la torre **6.** Estos valores se pueden corregir matemáticamente para tener en cuenta la diferencia de velocidad en distintos puntos a lo largo de la pala, utilizando una tabla de búsqueda (LUT, por sus siglas en inglés) u otras técnicas para corregir datos de la imagen basándose en parámetros geométricos bien conocidos en programación científica y fotogrametría.

La Figura **8** muestra una realización del cancelador de la rotación de la imagen térmica que consiste en un espejo **241,** unido a una bisagra **250** por un extremo, estando el extremo opuesto conectado a un accionador lineal o accionador lineal **238** de bobina móvil a través de una articulación esférica o articulación universal **240,** cuyo movimiento cíclico en la dirección del movimiento de la pala se puede ajustar para seguir el movimiento aproximado de cada pala **11** a medida que gira a través del campo de visión. Básicamente, la cancelación de la rotación detendrá el movimiento de rotación durante varios fotogramas. La pala parece estar suspendida en el espacio, lo que da tiempo a la cámara térmica para generar imágenes de mayor resolución de la pala en movimiento. Los

ajustes consisten en la amplitud de la tensión **260** en rampa, que ha de compensar la velocidad de rotación de la pala, la duración de la función **262** en rampa y el tiempo **264** entre cada inicio de la función en rampa. La salida del generador **244** de funciones es amplificada en el amplificador **242**, que a continuación impulsa el accionador **238** de motor lineal**.** El movimiento del espejo **241** puede cancelar la rotación de secuencias cortas de imágenes producidas por la cámara térmica **222.** Mediante la selección de la tasa **262** de repetición, el usuario puede elegir obtener imágenes de todas las palas si el movimiento de seguimiento comienza cada τ/3 segundos, donde τ es igual al período de rotación de la turbina, en segundos, o bien, seleccionando una tasa de repetición τ, se mostrarán las imágenes de la misma pala **14** y se cancelará la rotación de las mismas. Se puede emplear un resorte para proporcionar una fuerza restauradora que devuelva el espejo a su posición inicial, listo para el siguiente paso de la pala. Solo se necesitan rastrear uno o varios fotogramas de vídeo para mejorar sustancialmente la difuminación de la imagen térmica de la cámara debida a la rotación de la pala. La frecuencia de movimiento del espejo **241** cancelador de la rotación se puede calcular con el siguiente ejemplo. Supóngase una turbina que gira a 15 r.p.m., una cámara térmica **222** con una frecuencia de imagen de 30 fotogramas por segundo, y que se desea cancelar la rotación en 4 fotogramas de vídeo. El período τ de la turbina es el tiempo requerido para efectuar 1 revolución, en este caso 60 segundos/15 r.p.m. = 4 segundos. Durante ese tiempo, la cámara térmica **222** (funcionando a 30 fotogramas por segundo) captura (4 segundos x 30 fotogramas por segundo) = 120 fotogramas. Los 4 fotogramas en los cuales se desea cancelar la rotación se capturan en un tiempo de (4 fotogramas/30 fotogramas por segundo) = 0,133 segundos. Para cancelar la rotación de estos cuatro fotogramas, se comienza a mover el espejo para seguir la pala en el tiempo inicial de 0 segundos, cuando la pala **14** entra en el campo de visión de la cámara térmica. El ángulo del espejo **241** va cambiando (aumentando o disminuyendo según la dirección en que se mueva la pala a través del campo de visión) de manera continua durante 0,133 segundos, y luego vuelve a la posición inicial. Para seguir solamente una pala, se inicia el movimiento de seguimiento cada 4 segundos (τ). Para seguir las tres palas en secuencia, se inicia el movimiento de seguimiento cada τ/3 segundos, 4/3 = 1,33 segundos. Después de cada movimiento de seguimiento, se devuelve el espejo a la posición inicial para esperar el siguiente ciclo de seguimiento.

La Figura **9** muestra una segunda realización en donde se desplaza en rotación la cámara térmica **222** para seguir el movimiento de la pala **11** en torno al eje **7**. La cámara térmica **222** está montada en un bastidor o placa **251** y conectada a la bisagra **252**, que también está unida al elemento **250** de bastidor que sostiene el accionador **238.** El extremo opuesto de la placa **251** está conectado al accionador eléctrico a través de una articulación flexible, por ejemplo una bisagra o articulación universal. El movimiento del accionador hace que la cámara térmica **222** se desplace arriba y abajo, lo cual, cuando se alinea con una parte de la pala que tiene sustancialmente el mismo movimiento, tenderá a estabilizar la pala en el campo de visión de la cámara térmica **222.** Pueden funcionar simultáneamente accionadores adicionales para desplazar la cámara térmica en múltiples direcciones, pero añaden una complejidad adicional. En la práctica, es suficiente un accionador si se puede conseguir sobre el terreno una vista nítida de la pala **11** cuando alcanza la posición horizontal durante la rotación. Otra opción es hacer girar todo el accionador 238, las placas de soporte **250** y **251** y también la cámara térmica **222**, con el fin de alinear el movimiento del accionador con el movimiento de la pala durante la adquisición de datos. La disminución de la masa accionada reduce la vibración y las necesidades energéticas del sistema electrónico y el accionador eléctrico, que pueden funcionar con batería o mediante la energía del vehículo utilizado por el técnico. El movimiento de la cámara debe alinearse aproximadamente con la dirección del movimiento de la pala **11** de la turbina en el campo de visión de la cámara durante su rotación sobre el eje **7.**

A medida que el lado de alta presión de la pala que, visto desde el lado de barlovento de la torre **6** en la posición **220**, está girando hacia la derecha, se eleva en el campo de visión de la cámara **222,** el borde de ataque del álabe cruza en su caso el marcador **242** de umbral**.** Este movimiento puede ser identificado como un cambio en el valor de intensidad de píxel con respecto al cielo abierto tal como lo ve la cámara térmica **222,** y el *software* activa electrónicamente el inicio del movimiento del accionador lineal **238** por medio del ordenador **230**, el generador **244** de formas de onda y el amplificador **242.** De nuevo, una forma de onda óptima es una función en rampa que ha de mover la cámara **222** con una velocidad angular constante para recibir en la lente **228** las emisiones térmicas **226** procedentes del defecto **224** de la pala mientras se mueve verticalmente a través del campo de visión con una velocidad constante. Esta realización también puede emplear un espejo móvil. El soporte de trípode también puede estar dotado de un acimut y elevación mecánicos mediante, por ejemplo, una varilla **258** conectada a través de una articulación flexible **254** con el bastidor de base de la cámara **250** y sujeta mediante la abrazadera **260** al motor lineal que proporciona el movimiento fino de la cámara térmica o de un espejo. Aunque la realización mostrada utiliza un trípode **204** para sostener la cámara térmica y el mecanismo de cancelación de la rotación de la imagen, se puede emplear cualquier soporte resistente, entre ellos un camión, furgoneta, automóvil o carro con ruedas, para mover fácilmente el equipo en torno al emplazamiento de la turbina eólica. La Figura **10** muestra una gráfica de tensión frente a tiempo de la señal utilizada para impulsar el accionador de cancelación de la rotación de la imagen. En la realización en donde la cancelación de la rotación se hace funcionar manualmente, el generador de funciones trabaja de manera continua. El técnico ajusta la velocidad de repetición para hacer que coincida con el período τ, **268**, de rotación de la turbina**.** La función en rampa que se muestra en la Figura **10** tiene una duración de 0,133 segundos para coincidir con el tiempo de visualización de cuatro fotogramas de vídeo. El sistema electrónico o de software puede estar diseñado para permitir que el técnico introduzca directamente estos valores y mueva el dispositivo de cancelación de la rotación, ya sea usando el espejo móvil **241** o bien las configuraciones de la cámara térmica móvil.

La Figura **11** es un dibujo esquemático que muestra la adición de un soporte de cardán para estabilizar la cámara térmica **222,** y sus diversos mecanismos de movimiento y realizaciones descritas en la presente memoria, durante su uso en el agua a bordo de una embarcación, al objeto de inspeccionar palas **11** montadas en generadores eólicos marinos. En una realización, el contrapeso **280** está sostenido por un soporte de cardán compuesto por un bastidor interno **270** y un bastidor externo **272** conectados por pernos **274** y **276** de cojinete**,** así como un alojamiento de soporte o miembros **278** de bastidor que están soportados en la cubierta **29** de la embarcación. Esto permite que la cámara **222** permanezca alineada con la pala **11** durante las inspecciones. Este conjunto de cardán también puede disponer de motorización activa y emplear servoaccionadores y acelerómetros, bien conocidos en la técnica, para proporcionar una plataforma estable con respecto al movimiento de balanceo y cabeceo de la embarcación, con el fin de lograr un funcionamiento satisfactorio del sistema de inspección de palas descrito en la presente memoria. Además, el sistema de ensayo de palas embarcado puede utilizar una plataforma de inercia para mantener la cámara apuntada a la pala objetivo durante los ensayos, compensando el movimiento de la nave. La Figura **12** es un diagrama esquemático del sistema de inspección de palas de turbina eólica descrito en la presente memoria, con la adición de una grabadora de vídeo, videocámara, cámara fotográfica o cámara de vídeo **242** y una fuente luminosa **244,** configuradas para registrar durante el ensayo el número **282** de serie escrito en el extremo **10** de encastre de cada pala. Con frecuencia, la posición óptima de la cámara térmica durante el ensayo no es la misma posición en que se precisa colocar la cámara de número de serie para obtener una imagen del número de serie. Se puede emplear cualquiera de distintas técnicas para sincronizar las termografías con las imágenes del número de serie. En primer lugar, un reloj GPS que proporcione señales de sincronización en la pista de sonido de una videocámara, así como señales de sincronización a la cámara térmica **222** o al ordenador **230,** si está conectado en el momento de la adquisición de datos. Como segunda opción, si se está utilizando el cancelador de la rotación de imágenes, se puede enviar una señal audible, eléctrica o visual por la línea eléctrica **243** a la cámara de número de serie cuando el accionador comienza a seguir la pala **11.** Puede ser necesario un retraso para sincronizar la captura de número de serie con la posición de la pala, con el fin de permitir que la pala se mueva desde el ángulo de prueba al mejor ángulo para captar el número de serie correcto.

La Figura **13** muestra dos resultados de ensayo en generadores de energía eólica de escala comercial, de 1,5 MW, en funcionamiento, efectuados con realizaciones de esta invención. La imagen superior muestra siete fotogramas de vídeo de una pala desde el lado de alta presión mientras gira a través del campo de visión de la cámara térmica. Las imágenes se grabaron en forma de un archivo .MOV y se reprodujeron mediante un *software* que genera una imagen de registro de pico. Se aprecia la trayectoria **246** de las emisiones térmicas de un defecto activo en propagación, a medida que la pala gira de arriba a abajo en el sentido de las agujas del reloj. Las líneas oscuras en la imagen del lado **14** de alta presión de esta pala son artefactos de la cámara térmica **222** debidos al movimiento rápido de la pala **11**. La imagen inferior muestra una imagen de prueba de un borde de ataque de la pala **11** que incluye la respuesta térmica del cubo **18**, la góndola **8** y la torre **6.** La prueba se realizó desde la posición **214** de la Figura **4.** Se aprecian dos señales de defectos **236**. Mediante el escalado a partir de características conocidas de la imagen, se ubican los defectos a 7,2 y 9 metros del extremo **10** de encastre**.**

Debe entenderse, sin embargo, que aunque en la descripción precedente se han expuesto numerosas características y ventajas de la presente invención, junto con detalles de la estructura y función de la invención, la descripción es solamente ilustrativa, y se pueden realizar cambios en el detalle, especialmente en cuestiones de forma, tamaño y disposición de piezas dentro de los principios de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para inspeccionar de manera remota una pala de turbina eólica *in situ*, que comprende:

obtener imágenes de una parte de una pala (11) de turbina eólica con una cámara termográfica (222) cuando la pala atraviesa un campo de visión de la cámara termográfica mientras la turbina gira y experimenta carga cíclica debida a la gravedad y a variaciones en las cargas de viento, y cuando la pala ha alcanzado sustancialmente el equilibrio térmico con el aire ambiente tras la puesta del sol, para generar datos termográficos;

analizar los datos termográficos para identificar patrones térmicos atípicos que podrían ser indicativos de calentamiento por fricción dentro de defectos, o en torno a los mismos, en el interior de la pala de turbina eólica.

2. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 1, el paso de obtener imágenes de la parte de la pala de turbina eólica incluye adquirir una secuencia continua de imágenes de más de una pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara termográfica.

3. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 2, que comprende además un paso de grabar las imágenes y crear una imagen compuesta de una selección de imágenes secuenciales de pala con un programa de vídeo de registro de pico para seguir el movimiento de la fuente de emisiones térmicas, con el fin de distinguir entre una zona de emisión térmica real de la pala y efectos térmicos sin relación.

4. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, siendo dirigida la radiación térmica a la abertura de la cámara mediante un dispositivo de cancelación de la rotación de la imagen consistente en un espejo móvil impulsado por un accionador, con el fin de compensar el movimiento de la pala y los efectos de degradación de la imagen resultantes.

5. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 4, en donde el espejo es impulsado por un accionador eléctrico que utiliza un generador de funciones dotado de controles manuales para frecuencia, forma de onda y amplitud.

6. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, siendo dirigida la radiación térmica a la abertura de la cámara mediante un dispositivo de cancelación de la rotación de la imagen consistente en un espejo móvil impulsado en múltiples ejes por múltiples accionadores con el fin de mover un espejo para compensar el movimiento de la pala, en donde el accionador eléctrico es impulsado con dos formas de onda separadas, procedentes de dos generadores de funciones con controles manuales para frecuencia, forma de onda y amplitud.

7. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 6, en donde la forma de onda es una función en rampa o en diente de sierra.

8. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, siendo dirigida la radiación térmica a la abertura de la cámara mediante un dispositivo de cancelación de la rotación de la imagen consistente en un espejo móvil impulsado en múltiples ejes y múltiples accionadores que emplean una forma de onda generada por microprocesador u ordenador.

9. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, siendo dirigida la radiación térmica a la abertura de la cámara mediante un dispositivo de cancelación de la rotación de la imagen consistente en un espejo móvil impulsado por un accionador multieje con el fin de mover un espejo para compensar el movimiento de la pala, en donde el espejo lo mueve un accionador eléctrico empleando una forma de onda generada por microprocesador u ordenador con un dispositivo de activación externo para detectar la posición de la pala e iniciar el seguimiento de la pala, reduciendo así la degradación de la imagen térmica de la pala a causa de la rotación.

10. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, siendo dirigida la radiación térmica a la abertura de la cámara mediante un dispositivo de cancelación de la rotación de la imagen consistente en un espejo móvil impulsado por accionador sencillo o accionadores multieje, con el fin de compensar el movimiento de la pala, en donde el o los accionadores son impulsados con forma de onda generada electrónicamente, con una señal de activación electrónica procedente de la cámara térmica que indica que la imagen de la pala giratoria está entrando en el campo de visión de la cámara térmica e inicia la impulsión del espejo y el seguimiento de la pala, reduciendo así la degradación de la imagen térmica de la pala a causa de dicha rotación.

11. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, estando la cámara térmica montada sobre un miembro de soporte articulado con un accionador de inclinación vertical y sistemas electrónicos de accionamiento consistentes en un generador de formas de onda y amplificador para seguir aproximadamente la imagen de la pala durante una parte de la rotación, reduciendo así los efectos de degradación del movimiento de la pala en la imagen de la cámara térmica.

12. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, estando la cámara térmica montada sobre un miembro de soporte articulado con un accionador de inclinación vertical con sistemas electrónicos de accionamiento consistentes en un generador de formas de onda y amplificador para seguir la imagen de la pala durante una parte de una rotación angular, con una señal de activación electrónica procedente de la cámara térmica que indica que la imagen de la pala giratoria está entrando en el campo de visión de la cámara térmica e inicia un accionamiento vertical de la cámara y el seguimiento aproximado de la pala, reduciendo así la degradación de la imagen térmica de la pala a causa de dicha rotación.

13. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, estando la cámara térmica montada sobre un miembro de soporte articulado con un accionador de inclinación vertical y un accionador panorámico horizontal con sistemas electrónicos de accionamiento consistentes en dos generadores de forma de onda y amplificadores para seguir una parte de la imagen de la pala durante la rotación, reduciendo así los efectos de degradación de la imagen térmica por el movimiento de la pala.

14. Un método para inspeccionar de manera remota una pala o palas de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una única imagen o una serie continua de imágenes de cada pala cuando atraviesa el campo de visión de la cámara térmica, estando la cámara térmica montada sobre un miembro de soporte articulado, con un accionador de inclinación vertical y un accionador panorámico horizontal con sistemas electrónicos de accionamiento consistentes en dos generadores de onda y amplificadores, con una señal de activación electrónica procedente de la cámara térmica que indica que la imagen de la pala giratoria está entrando en el campo de visión de la cámara térmica e inicia el accionamiento del movimiento de la cámara y el seguimiento aproximado de la pala, reduciendo así la degradación de la imagen térmica de la pala a causa de dicha rotación.

15. Un método para inspeccionar de manera remota una pala de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba de manera continua una imagen de vídeo de números de serie de pala en el extremo de encastre de la pala, con una cámara de vídeo y una fuente de iluminación con luz apropiada, y se sincroniza con fotogramas de vídeo procedentes de una cámara térmica que toma imágenes de la pala en busca de anomalías mediante el uso de una señal de sonido grabada por la cámara de vídeo y activada manualmente por un técnico cuando aparece el defecto en una pantalla de vídeo de la cámara IR o del ordenador, identificando así el número de serie de la pala con defectos detectados.

16. Un método para inspeccionar de manera remota una pala de turbina eólica según la reivindicación 3, en donde se graba una imagen de vídeo de una vista iluminada de números de serie de pala en el extremo de encastre de la pala y se sincroniza con fotogramas de vídeo procedentes de una cámara térmica que toma imágenes de la pala en busca de anomalías, utilizando señales de sincronización GPS.

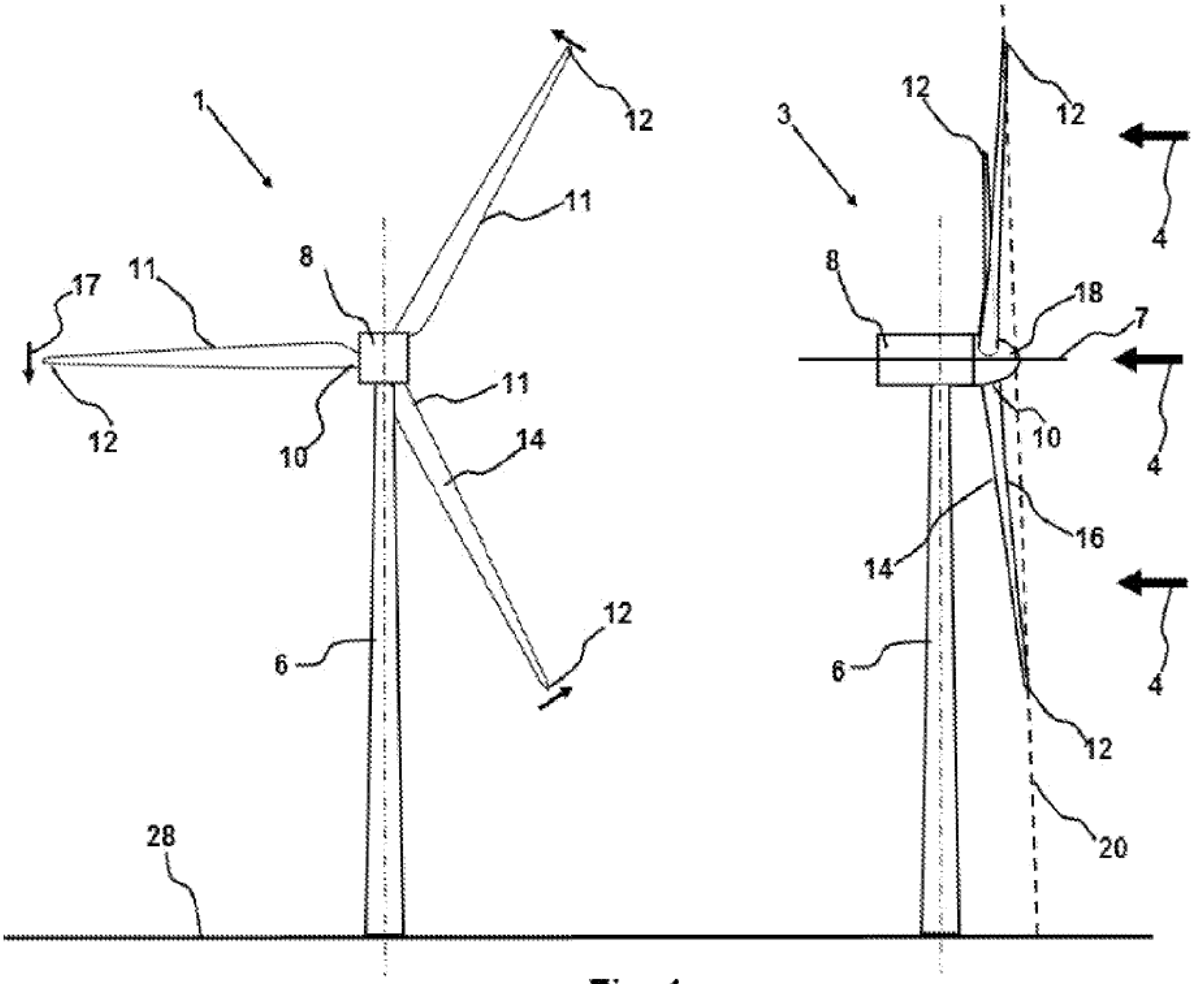


Fig. 1

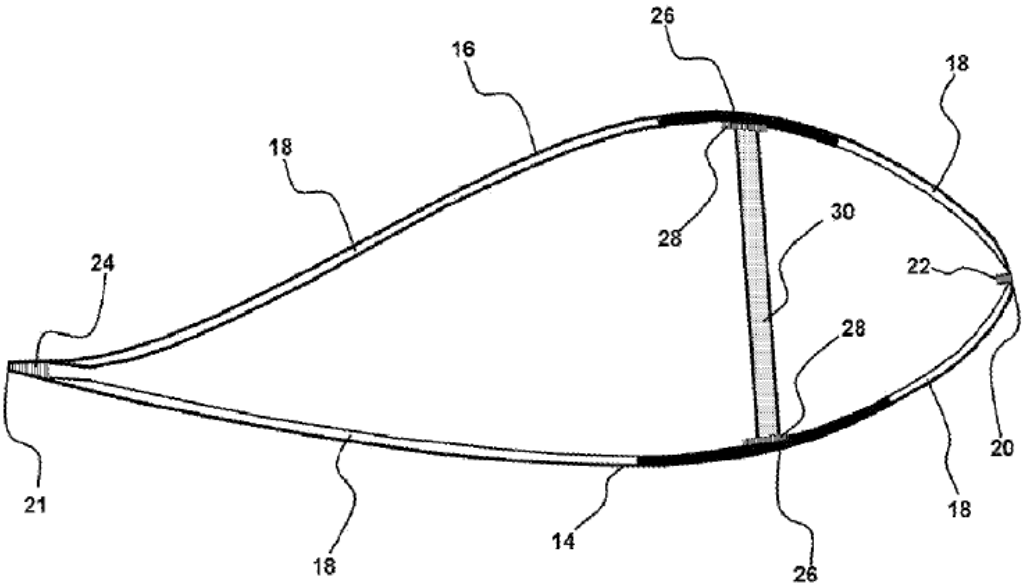


Fig. 2

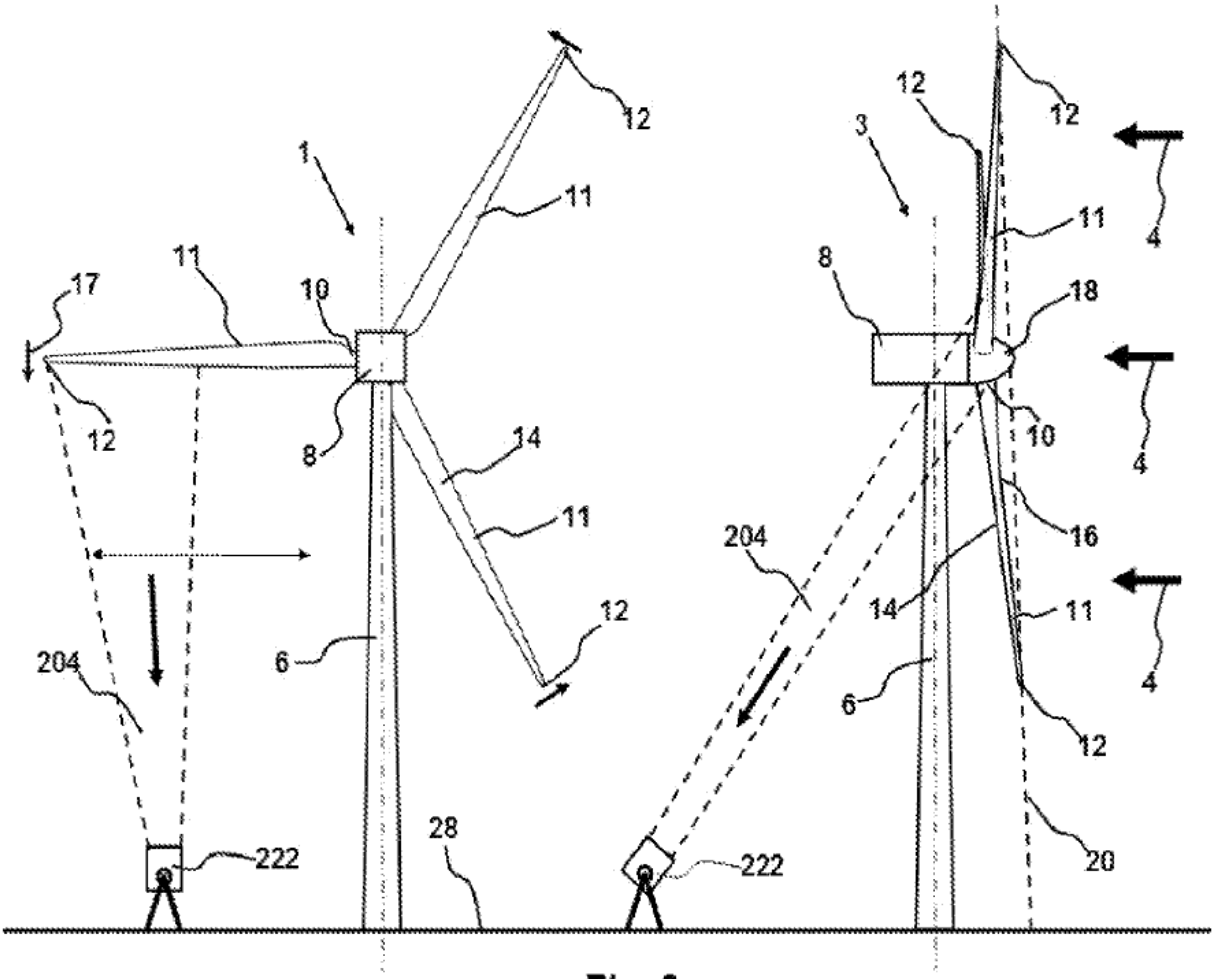

1
12
11
17
11
10
12
8
14
11
12
204
6
222
28
3
12
12
11
4
8
18
10
4
16
204
14
11
4
6
12
222
20

Fig. 3

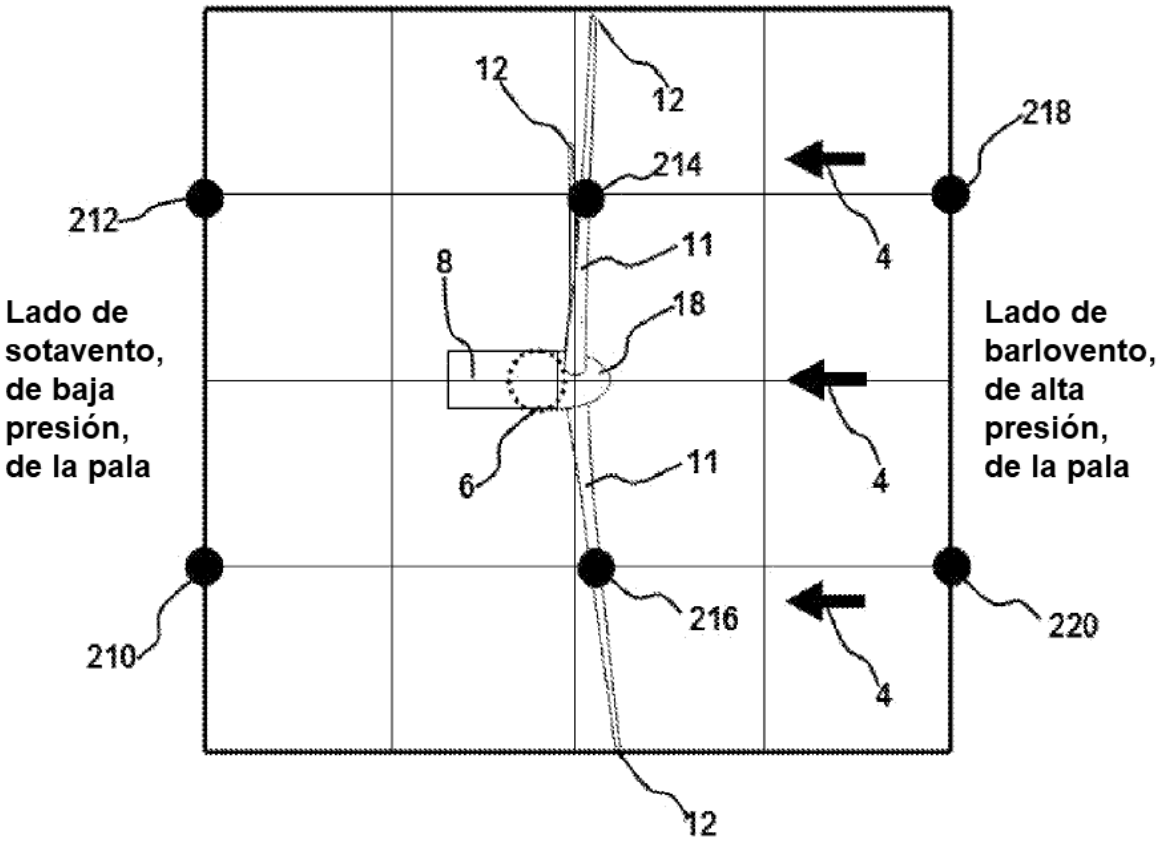

12
12
218
214
212
4
11
8
18
Lado de sotavento, de baja presión, de la pala
Lado de barlovento, de alta presión, de la pala
6
11
4
216
220
210
4
12

Fig. 4

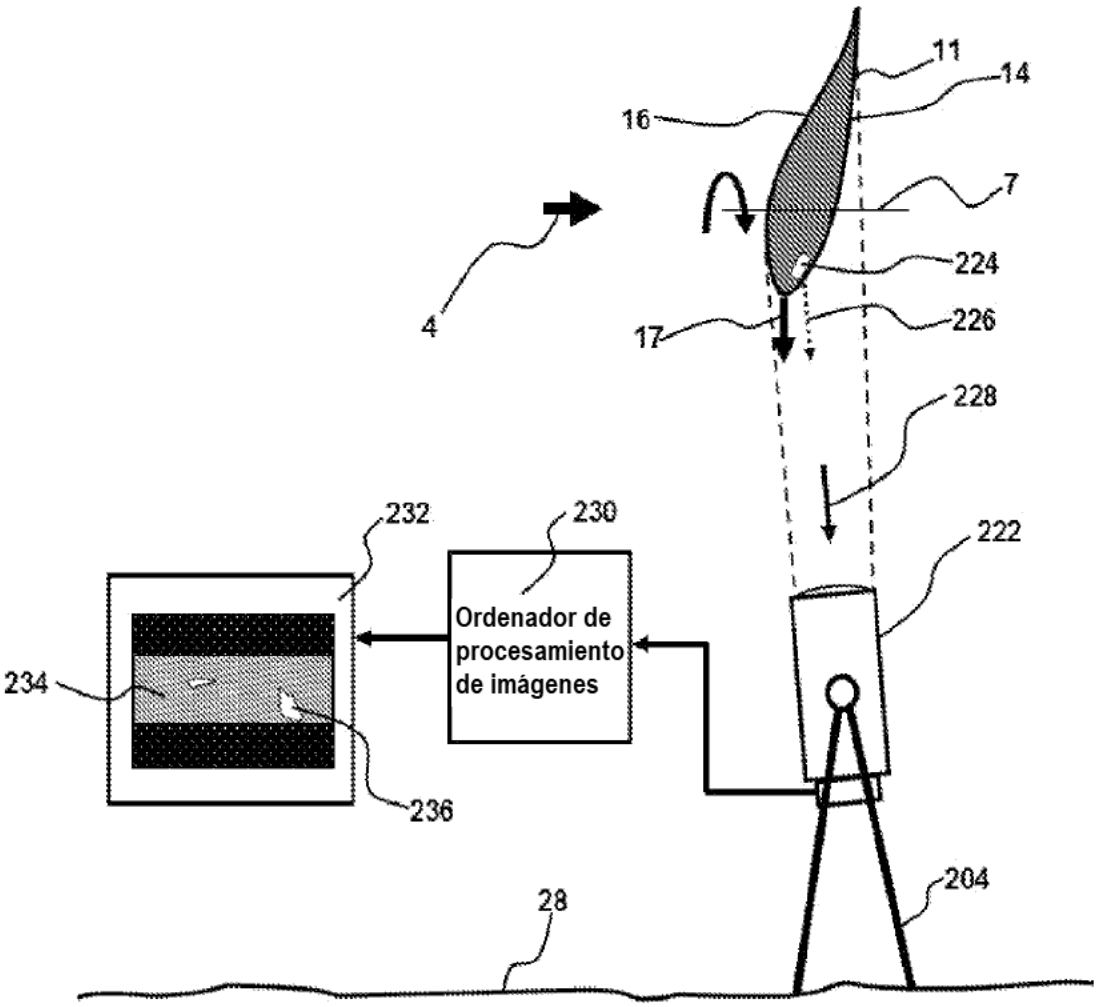

11
14
16
7
224
4
17
226
228
232
230
222
Ordenador de procesamiento de imágenes
234
236
204
28

Fig. 5

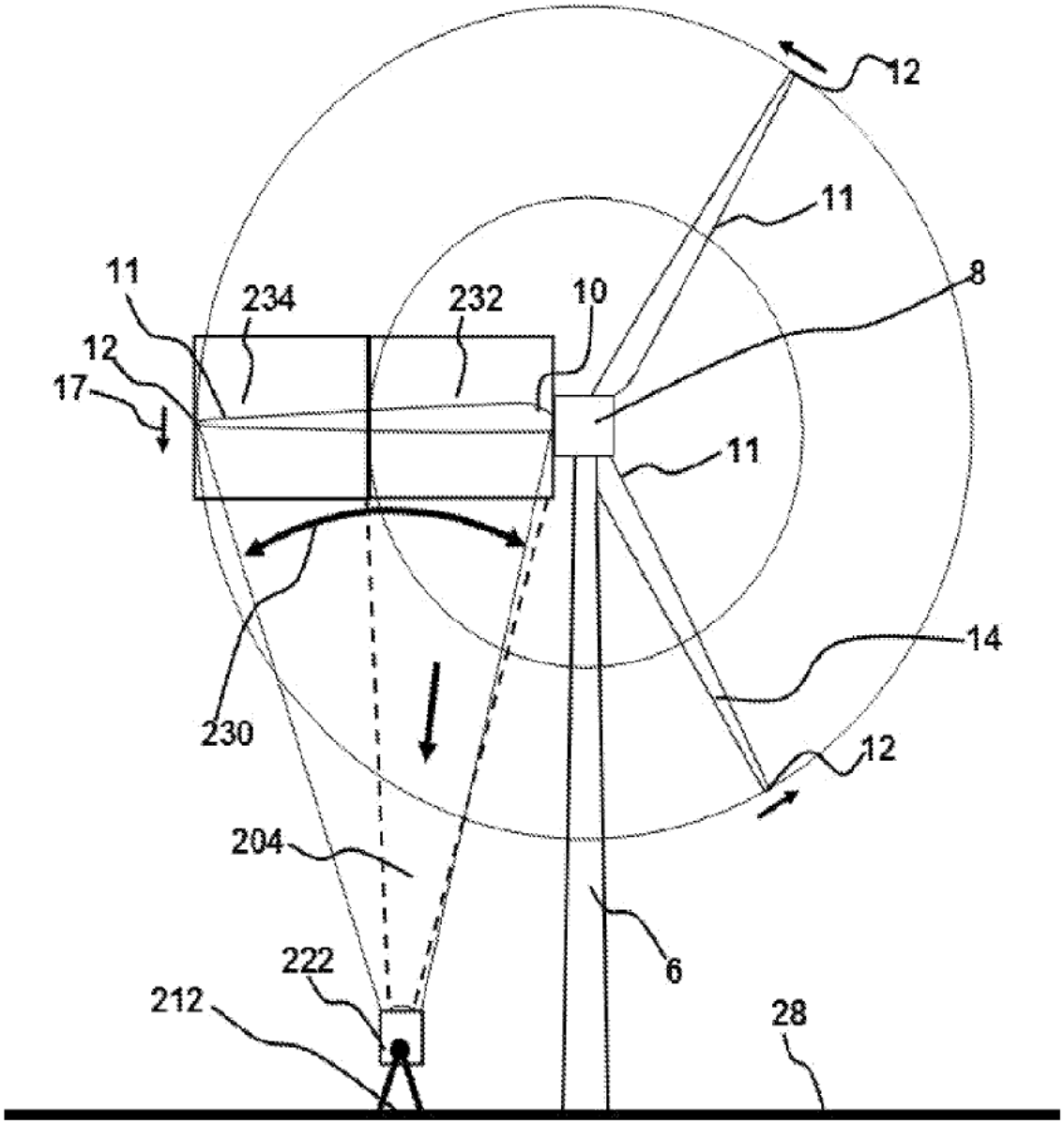


Fig. 6

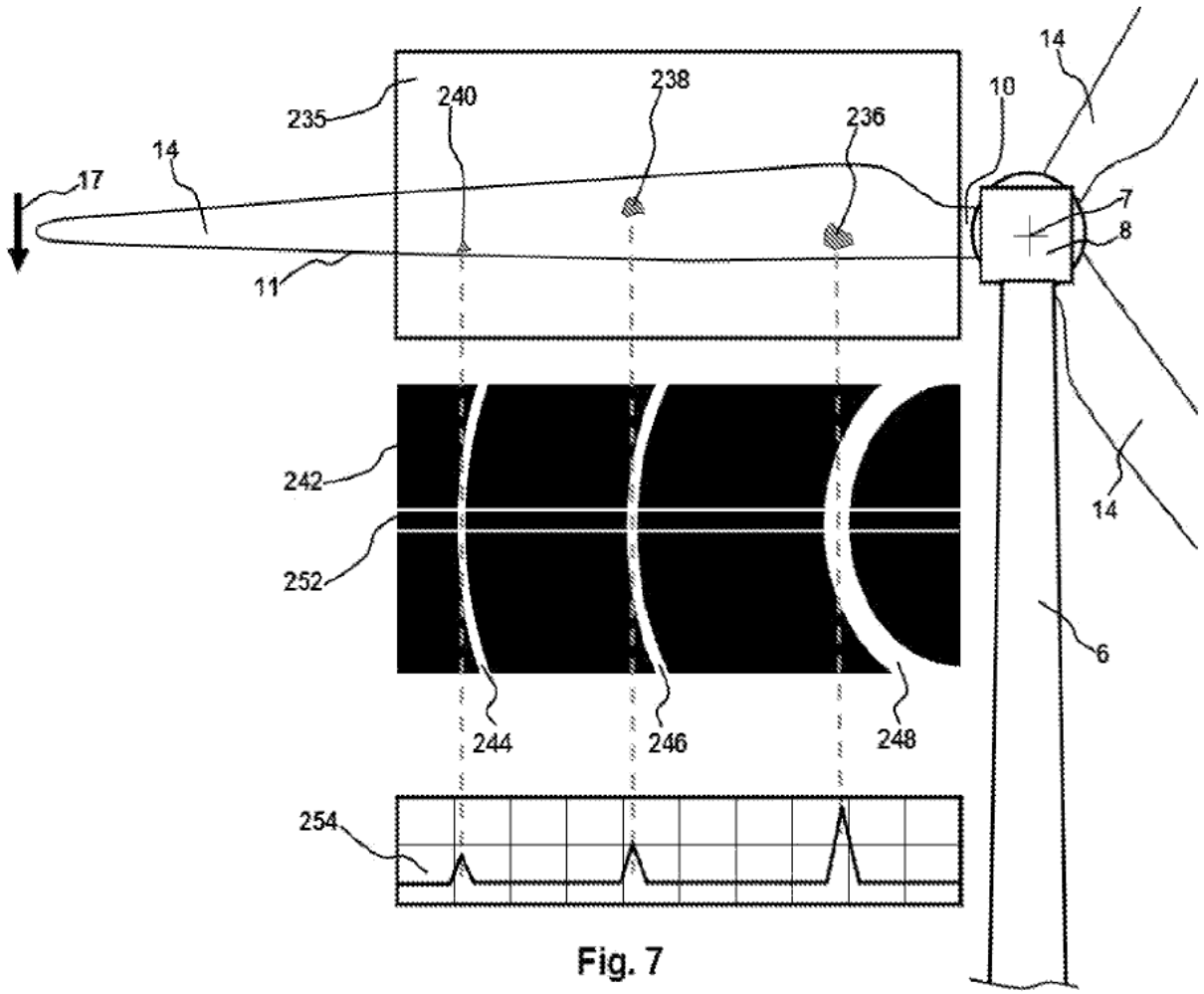


Fig. 7

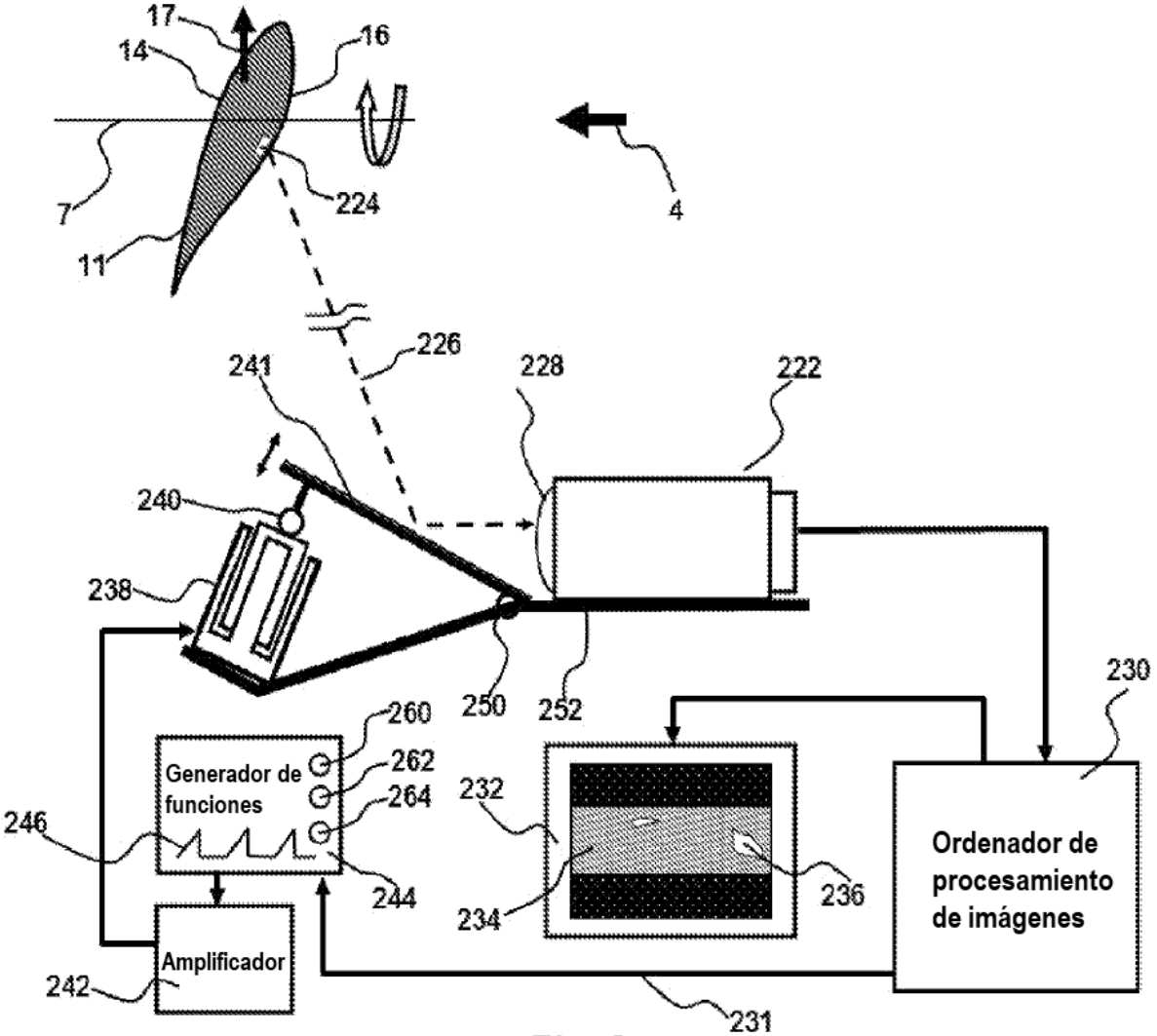

17
14
16
7
224
4
11
226
241
228
222
240
238
250
252
230
260
262
264
Generador de funciones
246
232
236
234
244
Ordenador de procesamiento de imágenes
Amplificador
242
231

Fig. 8

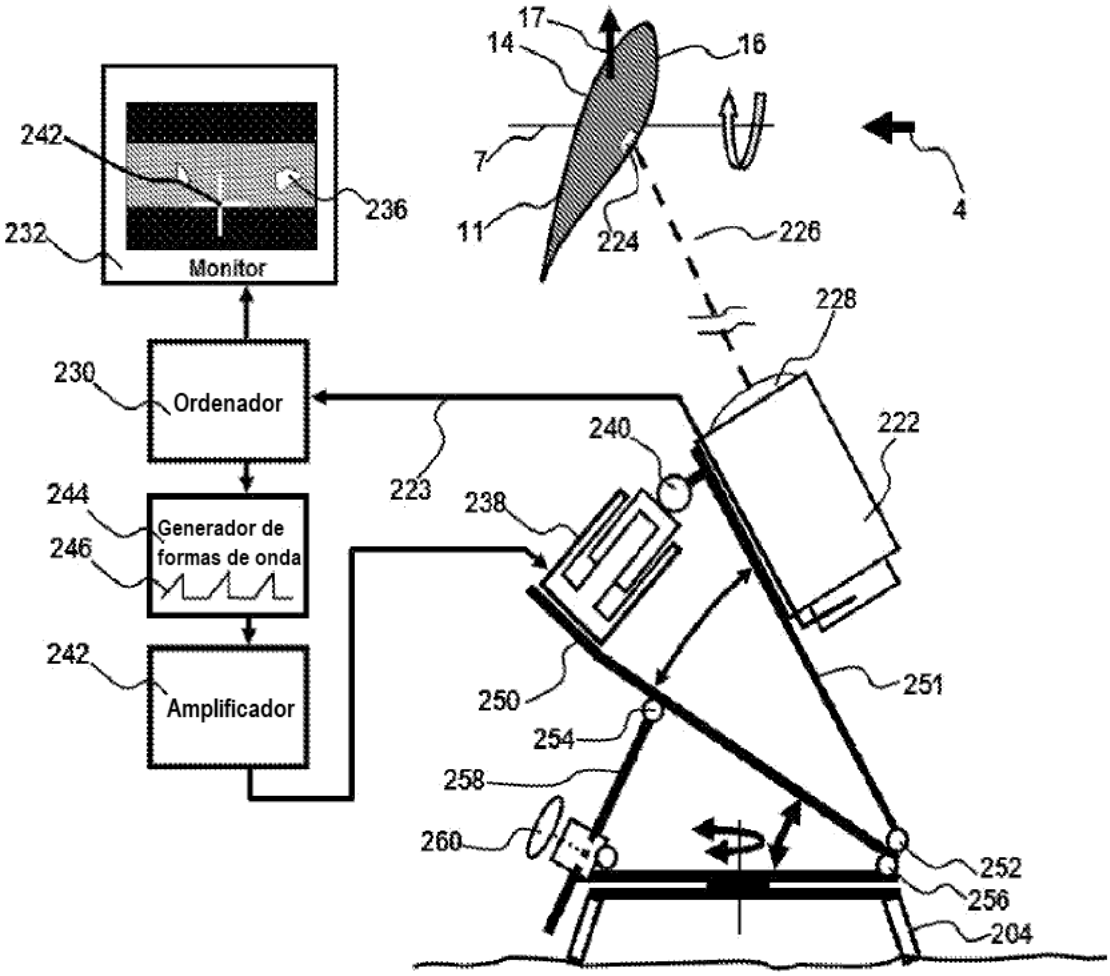

17
14
16
242
7
236
4
232
11
224
226
Monitor
228
230
Ordenador
240
222
223
244
238
Generador de formas de onda
246
242
Amplificador
250
251
254
258
260
252
256
204

Fig. 9

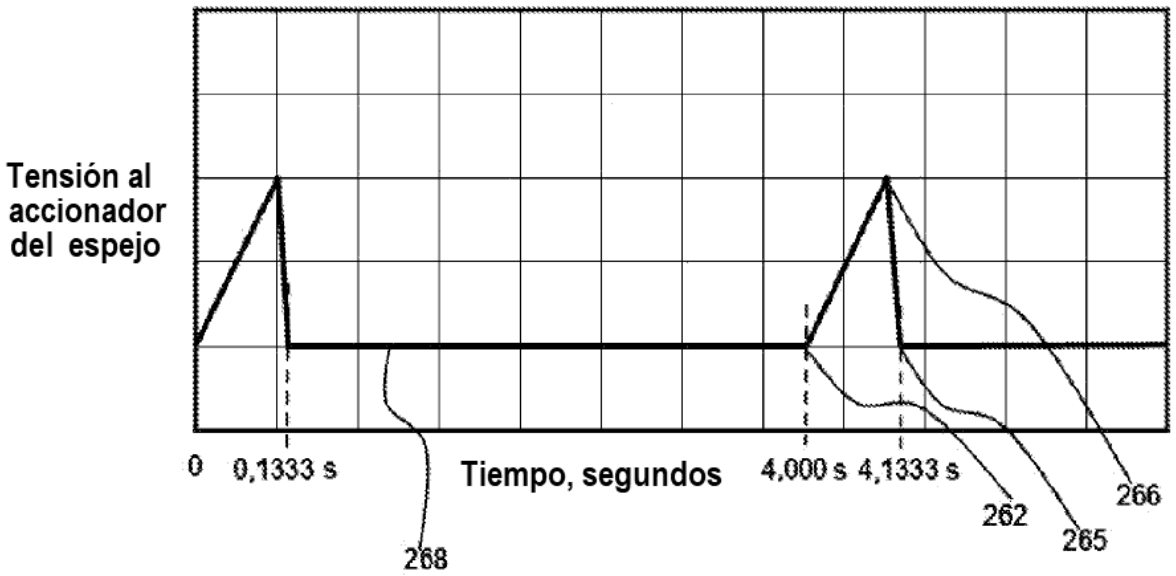

Tensión al accionador del espejo
0
0,1333 s
Tiempo, segundos
4,000 s
4,1333 s
268
262
265
266

Fig. 10

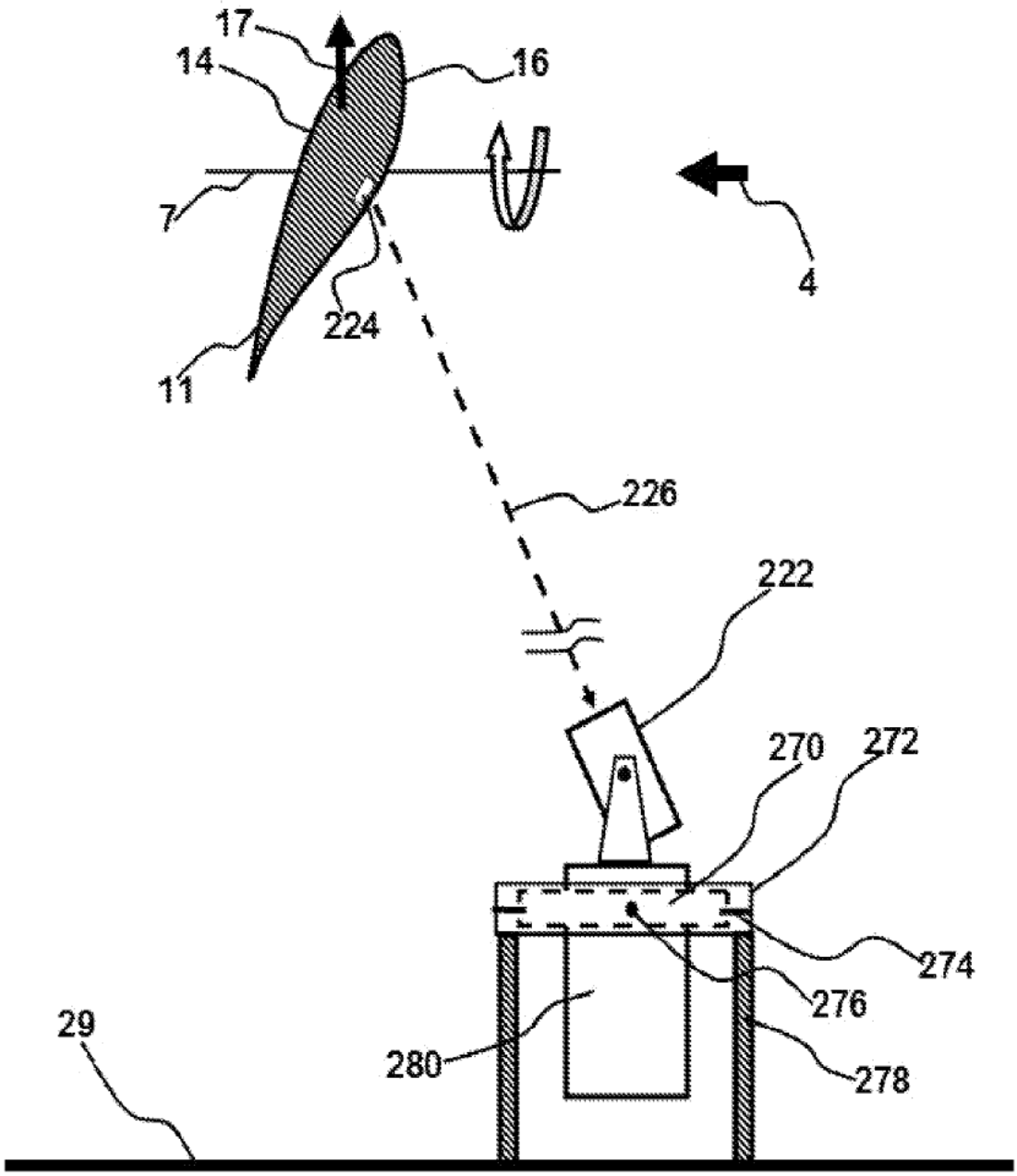


Fig. 11

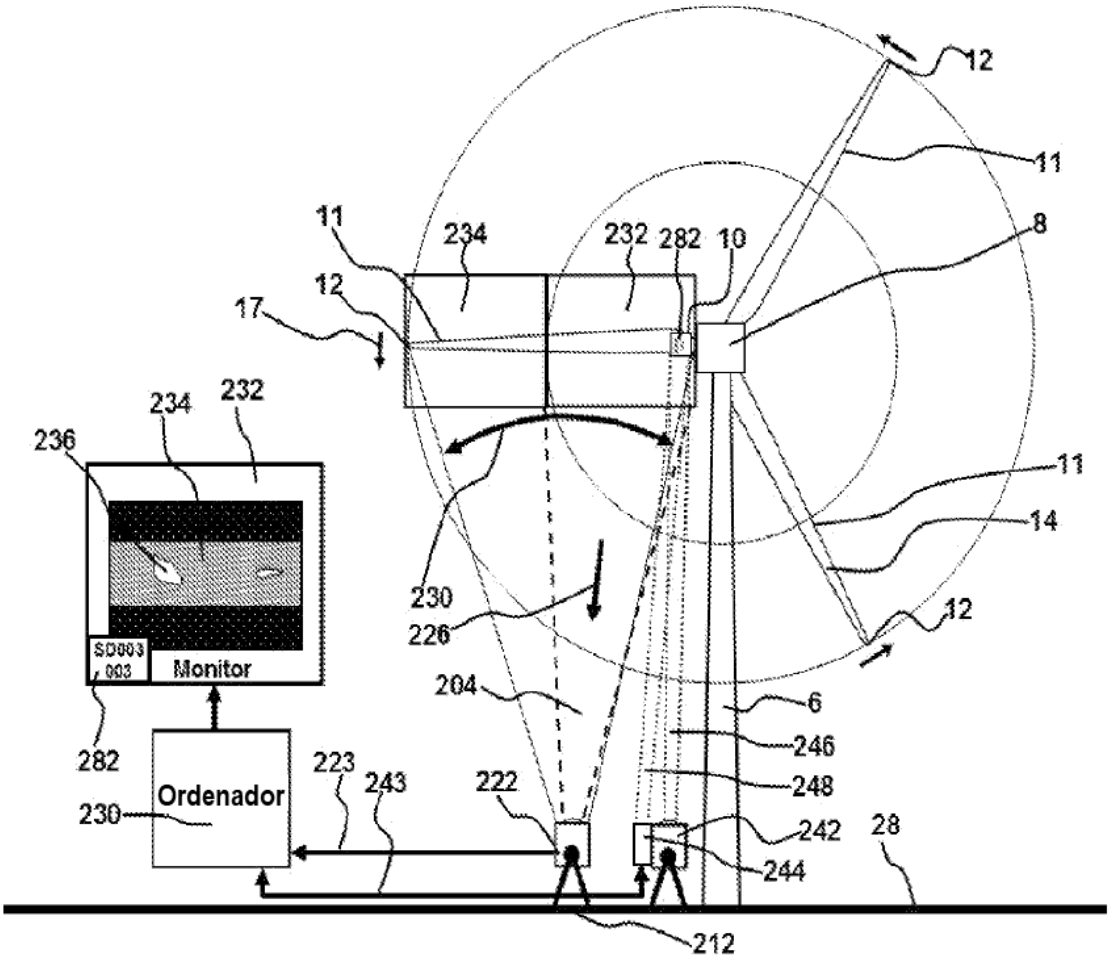
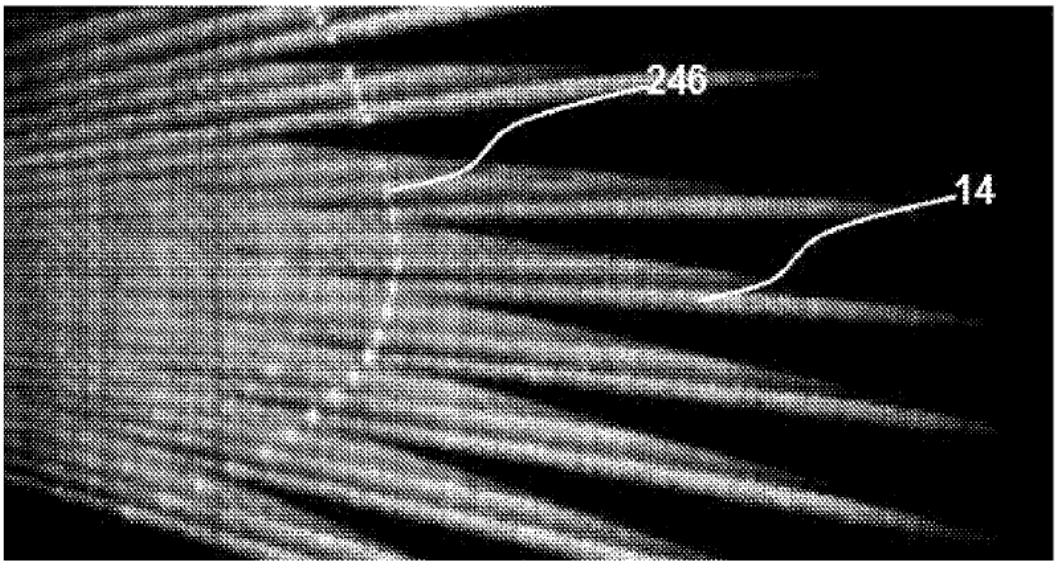

12
11
11
234
232
282
10
8
12
17
234
232
236
11
14
230
226
12
SD003
003
Monitor
204
6
246
282
223
243
222
248
Ordenador
230
242
28
244
212

Fig. 12



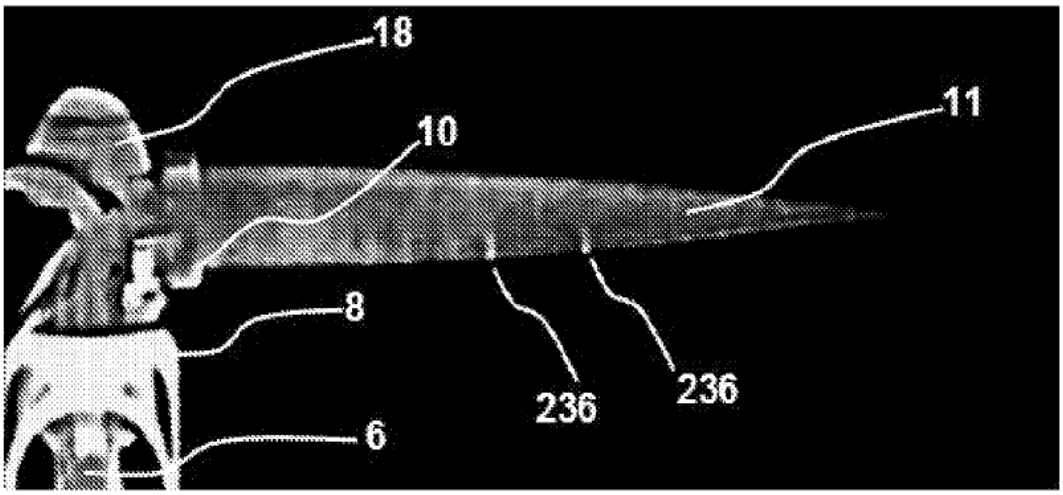


Fig. 13