

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 668 451**

51 Int. Cl.:

F03D 13/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.03.2014 PCT/US2014/030189**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.09.2014 WO14145423**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.03.2014 E 14715816 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.02.2018 EP 2984337**

54 Título: **Ensayo no destructivo de palas de turbinas eólicas desde el suelo durante la operación**

30 Prioridad:

15.03.2013 US 20131384070

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 2 668 451 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

Ensayo no destructivo de palas de turbinas eólicas desde el suelo durante la operación

Antecedentes de la invención

1. Campo de la invención

- 5 La invención se refiere a un método y a un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas y equipos de generación de energía en generadores de turbinas eólicas giratorias.

2. Descripción de la tecnología relacionada

10 Debido a su gran tamaño y extensa área de superficie y a la forma compleja, las palas de turbinas eólicas son difíciles de inspeccionar de forma no destructiva, incluso en la fábrica. La inspección visual no ve defectos debajo de la superficie. Las técnicas activas de inspección de termografía son efectivas para defectos cercanos a la superficie, pero pueden dar falsos positivos y falsos negativos debido a variaciones en el espesor del material y a la emisividad de la superficie. Las técnicas ultrasónicas con haces en ángulo son muy lentas y es posible que no funcionen a través de tapas gruesas de fibra de carbono. Como resultado, las palas se instalan en torres y se ponen en servicio con una probabilidad significativa de defectos de fabricación latentes.

15 Además, las palas de material compuesto están sujetas a variaciones extremas de temperatura. El agua atrapada en las palas puede sufrir ciclos de congelación/descongelación, causando daños internos. Las fuerzas de gravedad cíclicas y las fuerzas variables del viento que actúan sobre las palas a medida que giran pueden causar daños por fatiga o la propagación de defectos latentes a lo largo del tiempo, mientras que los errores del proceso de fabricación pueden provocar un fallo prematura de la pala. Los defectos pueden crecer por debajo de la superficie de las palas, hasta el punto de que, cuando las grietas y el daño rompen la superficie y pueden detectarse visualmente, es posible que el daño no se pueda reparar en la torre.

20 La detección de daños progresivos debajo de la superficie y la propagación de defectos en palas de turbinas eólicas *in situ* es difícil. Los inspectores que utilizan grúas telescópicas o acceso por cable son costosos, requieren mucho tiempo y ponen al personal en un entorno de trabajo muy peligroso. El acceso con instrumentos portátiles para ensayos no destructivos requiere nuevamente acceso con cuerdas o plataformas aéreas y grúas. Se han desarrollado y probado rastreadores de pala y torre con sensores de ensayos no destructivos para inspección *in situ*, con implicaciones de alto coste, tasas de inspección lentas y efectividad cuestionable. Mientras está en la torre, el acceso cercano permite a los inspectores detectar visualmente defectos de la pala tales como divisiones en el borde posterior, grietas, daños por rayos y erosión de la pala.

30 Existe en consecuencia una necesidad creciente de unos métodos rápidos y rentables no destructivos de inspección para palas de turbinas eólicas para detectar estas y otras anomalías. Un método conocido, descrito en el documento EP 2 131 037, hace uso de emisiones acústicas de anomalías en palas de turbinas eólicas en operación.

Sumario de la invención

35 En consecuencia, un objeto de la invención es proporcionar un métodos rápidos y rentables no destructivos de inspección para palas de turbinas eólicas para detectar estas y otras anomalías.

40 Con el fin de conseguir los objetos anteriores y otros de la invención, un aparato para inspeccionar la rotación de las palas de una turbina eólica de acuerdo con un primer aspecto de la invención incluye un micrófono que se coloca aproximadamente en un plano de un disco de turbina en un punto bajo un nivel más bajo de una punta de una pala cuando gira, para recibir señales acústicas que emanan del aire que escapa a través de brechas en una línea de molde exterior de la pala desde un defecto interior o por debajo de la superficie en la pala; y un sistema para analizar las señales acústicas así recibidas para detectar la presencia de un defecto potencial.

45 Un método para detectar una anomalía en una pala de turbina eólica en rotación de acuerdo con un segundo aspecto de la invención incluye las etapas de monitorizar las emisiones acústicas procedentes de una pala de turbina eólica; y realizar un análisis Doppler sobre las emisiones acústicas para identificar una anomalía en la pala de la turbina eólica.

50 Estas y varias otras ventajas y características de la novedad que caracterizan la invención se señalan con particularidad en las reivindicaciones adjuntas y que forman una parte de la misma. Sin embargo, para una mejor comprensión de la invención, sus ventajas y los objetos obtenidos por su uso, se debe hacer referencia a los dibujos que forman una parte adicional de la misma, y a la descripción adjunta, en la que se ilustra y 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 escala funcional con eje horizontal.

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

La figura 3 es una representación gráfica de la presión de la punta interna respecto a la velocidad.

La figura 4 es una representación esquemática que muestra una torre de turbina eólica con tres palas y un defecto.

5 La figura 5 muestra una vista en planta de un sitio de turbina eólica con seis ubicaciones.

La figura 6 es un espectrograma acústico que muestra tres defectos de emisión de sonido en una pala de turbina eólica.

La figura 7 es una representación esquemática de un sistema para realizar un ensayo espectral acústica de un conjunto de palas de turbina eólica de acuerdo con una realización preferida de la invención.

10 La figura 8 es una representación esquemática del sistema mostrado en la figura 7.

La figura 9 es un espectrograma acústico que muestra la intensidad del sonido a lo largo del tiempo a medida que las palas de la turbina eólica pasan por un sensor acústico.

Descripción detallada de la(s) realización(es) preferida(s)

15 Un método y un aparato para el ensayo no destructivo de palas de turbina eólica de eje horizontal (HAWT) durante su operación se describe en el presente documento. El sistema y el método descritos a continuación permiten detectar y localizar anomalías en las palas de la turbina eólica detectando y analizando las señales acústicas generadas por la pala al moverse a través del aire y por el sonido emitido cuando el aire comprimido dentro de la pala de la turbina se escapa a través brechas en la línea de molde exterior de cada pala. Tales anomalías de la turbina como grietas, divisiones en el borde posterior, orificios de iluminación, daños, erosión de la pala y ángulo incorrecto de inclinación de la pala pueden detectarse en segundos, y en muchos casos se puede determinar su ubicación en la pala. Además, las anomalías o cambios de condición en la maquinaria del generador de turbina en la góndola pueden detectarse desde el suelo. Dicha información tiene un potencial comercial significativo para la gestión óptima de activos eólicos y la programación de mantenimiento para reducir los costes.

20 A medida que las palas de la turbina eólica se giran a través del aire, el sonido es generado mediante múltiples fuentes. Primero, el aire dentro de las palas de la turbina eólica en operación se comprime hacia la punta de la pala debido a la aceleración centrípeta. Incluso con orificios de drenaje de agua, las grietas y las divisiones del borde posterior se revelan por los sonidos que emiten. Estas señales acústicas, según se registran desde el suelo cerca de la base de la torre, se desplazan con Doppler, lo que permite calcular la distancia del defecto desde el eje de la turbina o desde el extremo de la raíz de la pala. En segundo lugar, la señal acústica de banda ancha de turbulencia de aire con cada paso de pala monitorizada desde el suelo o el nivel del mar con un micrófono de banda ancha sensible puede analizarse con un analizador de espectro para revelar patrones consistentes con la erosión de la pala o un ángulo de inclinación de pala o para la velocidad o la dirección del viento que indica sensores defectuosos o un problema con el actuador de inclinación.

25 La realización preferida incluye un micrófono sensible sobre un rango amplio de frecuencias de 100 Hz a 80kHz, un ordenador con software para analizar las señales acústicas generadas por la pala cuando se mueve a través del aire y por el sonido emitido por el aire que escapa a través de grietas, orificios y brechas en la línea de molde exterior de la pala. Una cámara fija o de vídeo, activada por el ordenador, mediante señales horarias o manualmente por el operador, basada en el espectrograma en tiempo real, se usa para identificar el número de serie de la pala para cualquier pala con una anomalía. También se detecta ruido debido a turbulencias anormales causadas por la distorsión de la pala, la erosión y el ángulo de inclinación incorrecto, que se puede comparar con los ensayos realizados periódicamente para identificar tendencias y cambios en las palas. Además, las anomalías o cambios de condición en la maquinaria del generador de turbina en la góndola y en el buje, tales como los actuadores de inclinación de las palas, algunos de los cuales operan continuamente a medida que la turbina gira, se pueden detectar desde el suelo.

35 Las turbinas eólicas normalmente operan con velocidades de punta de pala que son muchas veces mayores que la velocidad del viento. Por ejemplo, un generador de turbina típico de 2,3 MW (Modelo Siemens SWT-2.3-101) con palas de 49 m de largo y un diámetro de buje de 3 m tiene una circunferencia de barrido en la punta de la pala de $C = \pi \times 101 = 317,3$ m. A una velocidad de operación típica de 15 rpm, la velocidad de punta $V_t = 317,3 \text{ m} \times 15 \text{ rpm} = 4759,5 \text{ m/minuto}$, o al dividir por 60, $79,3 \text{ m/segundo}$ ($260,2 \text{ ft/seg}$ o $177,4 \text{ mph}$). Este generador de turbina tiene una velocidad de viento de corte típica de 3-4 m/seg y produce una salida nominal de potencia nominal a 11 m/seg, una velocidad del viento de solo el 13,8 % de la velocidad de la punta. La velocidad de rotación para cualquier ubicación en una pala puede expresarse como $V_L = 2\pi L/\tau$, donde L es la distancia desde el eje de la turbina y τ es el período de rotación de la turbina en segundos. Esta ecuación lineal permite el cálculo de la presión de aire dentro de una pala giratoria y, como mostraremos, puede usarse para determinar la ubicación de los defectos de emisión de sonido sobre las palas giratorias de la turbina, $L_D = LH_R$, donde L_D es la distancia del defecto desde la raíz de la pala, L es la distancia del defecto desde el eje de la turbina y H_R es el radio del buje de la turbina.

Una pala de turbina eólica giratoria hueca actúa para comprimir la columna de aire dentro de la pala hacia la punta de la pala debido a la aceleración centrípeta. Esta presión de aire aumentada en la punta se puede calcular como:

$$P_x = P_{\text{amb}} + \frac{1}{2} \rho \omega^2 x^2$$

Ecuación 1.

donde ρ es la densidad del aire

- 5 ω es la velocidad de rotación de la turbina
- x es la distancia desde la punta de la pala hasta
- el eje de la turbina

A medida que gira la pala y el volumen de aire contenido se comprime, se forma un vacío parcial en el extremo de la raíz de la pala que arrastra aire en la pala a través de huecos en los bordes de la placa de cubierta por donde pasa un hombre atornilladas al mamparo de extremo de la raíz de la pala. El aire comprimido que escapa a través de las grietas de la carcasa y se divide en uniones adhesivas a lo largo de los bordes anterior y posterior crean un tono silbante, que puede detectarse desde el suelo. Incluso con orificios de drenaje de agua en las puntas de las palas, se acumulará presión de aire dentro de las palas giratorias. Se sabe desde hace tiempo que las grietas y divisiones de las palas más grandes a menudo crean fuertes señales acústicas durante la operación de la turbina, que son fáciles de escuchar, especialmente desde la parte superior de la góndola. Un trabajador de mantenimiento de turbinas eólicas que oye un silbido de turbina sabe que la pala está rajada, pero no sabe qué pala o palas están defectuosas, cuántos defectos hay o dónde se encuentran. Además, otros defectos pueden emitir señales acústicas con baja amplitud o en frecuencias más allá del alcance del oído humano. El sistema descrito en este documento detecta estas señales acústicas desde el suelo utilizando el desplazamiento Doppler para determinar la ubicación de la distancia.

El micrófono de banda ancha se utiliza para detectar la señal acústica emitida desde defectos de la pala, que puede tener un componente significativo en el rango ultrasónico por encima del rango de la audición humana. La rotación de la placa desplaza Doppler la frecuencia emitida del defecto, de modo que cuando la pala se aproxima, el sonido recibido en el micrófono es más alto que el tono emitido real. A medida que la pala se aleja del micrófono, el sonido del tono emitido y el que se recibe en el micrófono y es más bajo Doppler. Usando las ecuaciones derivadas en el presente documento, se puede calcular la distancia desde la grieta o anomalía al buje de la pala. Además, el sistema detecta la firma acústica desplazada Doppler emitida por los cambios en la superficie de la pala debido a la erosión, y también las señales desde la turbulencia del aire cuando una pala opera con un ángulo de ataque incorrecto. Finalmente, esta invención muestra varios medios para identificar el número de serie específico de la pala.

Para realizar un ensayo acústico en palas de turbina eólica en operación, el micrófono se coloca cerca de la torre y se sujeta a mano o se monta en trípode. La posición no es crítica, pero debe ser dentro de 3-5 m, viento hacia arriba o hacia abajo del plano que contiene las puntas de las palas de la turbina y dentro de aproximadamente el 50 % del alcance de una pala desde la base de la torre. El micrófono se puede fijar a un trípode o a un vehículo (de tierra o agua), con una vista clara y sin obstrucciones del disco de la pala, para un movimiento rápido desde una torre a la siguiente durante una inspección del sitio.

El micrófono proporciona una señal a la tarjeta de sonido del ordenador, que contiene la capacidad de grabación de audio y el software de análisis de espectro acústico. El software del sistema puede operar manualmente o ser completamente automático. El ensayo se realiza ajustando primero estableciendo la ganancia de señal de la señal acústica para el paso de las palas. El analizador de espectro mostrará el espectro completo de la señal y la frecuencia máxima se puede ajustar para proporcionar una resolución óptima del espectro de la señal acústica. La primera medición es determinar el período de la turbina en segundos, que es el tiempo en segundos desde un primer pico de señal de paso de la pala hasta que el mismo pico se repite en la cuarta señal de paso de la pala. El operador puede usar la interfaz gráfica de la imagen al detener la visualización del espectro y medir el tiempo en segundos entre cuatro picos en la visualización del espectro. En tiempo real o cuando un espectro de período completo se congela en la pantalla, aparecen señales de defectos, con posibles sobretonos, como líneas onduladas en el espectro en la parte superior del ruido aerodinámico producido por la pala cuando pasa por encima. La señal del defecto es una frecuencia o tono constante, si se encuentra en el marco de referencia como la pala (teóricamente montada con la pala) o escuchando desde la góndola de la turbina cerca del eje de la turbina. La señal acústica de un defecto de la pala como se escucha desde la base de la torre en el suelo o flotando en un bote junto a una torre de turbina mar adentro, la señal se desplaza Doppler haciendo que el silbido pase desde un tono de alta frecuencia a medida que la pala se mueve hacia el micrófono a un tono de frecuencia más baja o un silbido cuando la pala se aleja del micrófono. La medición de las frecuencias máxima y mínima desplazadas Doppler de las indicaciones de defectos se puede hacer utilizando la visualización del espectro en la interfaz gráfica de usuario o puede ser realizada automáticamente por el software. El conocimiento de la temperatura del aire puede ingresarse manualmente en el ordenador o medirse con un sensor para determinar la velocidad del sonido en el aire desde una

tabla de búsqueda de almacén o el cálculo en la torre de la turbina cuando se recopilan los datos. El error debido a cambios en la densidad del aire con la altitud o cambios barométricos es generalmente mucho más pequeño que otros errores causados en las mediciones espectrales y generalmente no se considera.

5 Para turbinas eólicas en el mar, puede ser ventajoso instalar el micrófono de forma permanente en la torre, por encima del nivel de acción de las olas esperado. Los datos pueden transmitirse a través de la radio del sótano CSM a un receptor en tierra. Toda la unidad puede ser alimentada con energía solar usando una pequeña variedad de células fotovoltaicas y una batería recargable. Instalar dos o más micrófonos a diferentes alturas permitiría una mejor cobertura acústica de las grandes torres previstas para las torres mar adentro y una mejor precisión en la ubicación de los defectos.

10 La forma de las palas de las turbinas modernas es una superficie de sustentación supercrítica muy refinada. Las delaminaciones de las palas en las superficies compuestas, así como uniones de tapas de largueros a bandas de largueros débiles, rotas o inexistentes, permiten un mayor giro de la pala o flexión de la pala durante la operación, cambiando el flujo de aire y el ruido de las turbulencias del aire. Además, las desviaciones desde el ángulo de inclinación de la pala correcto desde los valores nominales pueden iniciar el inicio de la turbulencia y generar ruido.

15 Daños a la pala por rayos, grietas en la superficie de la pala que cambian el perfil de la superficie, delaminaciones que cambian el perfil de la sección transversal de la pala, pueden causar ruido debido a turbulencias y cambian el flujo de aire sobre las superficies de la pala. La firma acústica de una pala puede cambiar significativamente. Además, la falta de unión entre la banda del larguero y la tapa del larguero puede permitir que la pala se doble más durante el ciclo de rotación debido a la variación de la fuerza de gravedad y a la carga de la presión del viento que

20 otras palas que cambian de nuevo la firma acústica.

El método de ensayo y el aparato descritos en el presente documento pueden usarse también para comprobaciones periódicas para detectar cambios en el espectrograma acústico, intensidad de la señal y desplazamiento Doppler de señales mediante las que se pueden determinar las localizaciones de los defectos. Para determinar la ubicación inteligente de un defecto emisor de sonido en una pala, debemos medir:

- 25 τ = período de la turbina, segundos
- F_H = frecuencia desplazada Doppler de defecto máxima
- F_L = frecuencia desplazada Doppler de defecto mínima
- T = temperatura del aire

30 A partir de la geometría de una turbina eólica en rotación, la frecuencia emitida del defecto F_0 , puede determinarse como el promedio de las frecuencias desplazadas Doppler alta y baja para la señal, como se muestra en la Ec. 2.

$$\text{Ecuación 2. } F_0 = (F_H + F_L)/2$$

La velocidad tangencial de un defecto de la pala, V_D , a la distancia L desde el buje de la turbina, para una turbina con un período τ , los segundos se pueden expresar como se muestra en la Ec. 3:

$$\text{Ecuación 3. } V_D = 2\pi L/\tau, \text{ solucionando para L:}$$

35
$$\text{Ecuación 4. } L = V_D \tau = 2\pi$$

A partir de la ecuación Doppler, F_L , el desplazamiento Doppler de la señal de baja frecuencia es:

$$\text{Ecuación 5. } F_L = F_0 V_s / (V_s + V_D),$$

donde V_s es la velocidad del sonido en la torre.

40 Como la mayoría de las turbinas eólicas están situadas a una altura de menos de 5.000 ft. (1524 metros), sobre el nivel del mar, V_s se puede determinar a partir de una tabla de búsqueda corregida para la temperatura en la torre, aunque pueden usarse cualesquiera medios para la determinación exacta de V_s .

F_H , la señal de alta frecuencia desplazada Doppler es:

$$\text{Ecuación 6. } F_H = F_0 V_s / (V_s - V_D),$$

sustituyendo la Ecuación 2 para F_0 , obtenemos

$$F_H = \frac{(F_H + F_L) V_s}{(V_s - V_D)}$$

45
$$\text{Ecuación 7. } \quad \quad \quad 2$$

Resolviendo para V_D , obtenemos

$$V_D = \frac{2V_s F_H + 2V_s F_L}{4F_H}$$

Ecuación 8. $4F_H$

Sustituyendo la Ecuación 3, para V_D , obtenemos,

$$2\pi L = \frac{2V_s(F_H - F_L)}{4F_H}$$

Ecuación 9. τ $4F_H$

5 Resolviendo para L, la distancia desde el eje de turbina al defecto, obtenemos,

$$L = \frac{\tau V_s (F_H - F_L)}{4\pi F_H}$$

Ecuación 10. $4\pi F_H$

La distancia desde el extremo de la raíz de la pala al defecto entonces es,

Ecuación 11. $L_D = L - R_H$,

donde R_H es el radio del buje de la turbina

10 La figura 1 es un diagrama esquemático de una HAWT que es típica 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 extiende desde la superficie del suelo o del océano 28 para soportar la góndola 8 que contiene el generador y los reductores de engranajes, a menos que sea un generador de transmisión directa. Debe tenerse en cuenta que, si esta invención se utiliza en un barco para probar palas de turbinas eólicas en tierra, 28 sería la cubierta del barco desde donde se realiza el ensayo. El movimiento ondulatorio generalmente tendría componentes de velocidad demasiado pequeños para afectar significativamente las mediciones de frecuencia desplazada Doppler. Típicamente hay tres palas, 11, en una turbina eólica a escala de utilidad que tiene extremos de raíz 10 y puntas de pala 12. Como se ve desde la vista lateral 3, los extremos de raíz de la pala se unen al buje giratorio 18. El lado de la pala 16 que mira al viento 4 a menudo se denomina lado de alta presión. El lado de la pala 14, que está alejado del viento se denomina lado de baja presión o de succión. A medida que aumenta la velocidad de la pala 17, la inclinación de la pala se ajusta al ángulo óptimo de ataque al viento 4 para crear la elevación y el par máximo requeridos para accionar el generador de electricidad.

25 La figura 2 muestra la sección transversal de la construcción de una pala de HAWT típica. Las palas de turbina eólica se fabrican generalmente con carcasas de material compuesto unidas adhesivamente que forman el lado de alta presión 16 y el lado de baja presión 14. El borde posterior 21 está formado por carcasas 14 y 16 unidas adhesivamente como es el borde delantero 20, con unión adhesiva en algunos casos entre dos pestañas 22 formadas por las pieles de fibra de vidrio internas y externas que componen los paneles en sándwich 18. Dos tapas de larguero 26, que pueden estar hechas de fibra de vidrio o laminado de fibra de carbono u otro material compuesto, están unidas a los bordes de los paneles en sándwich 18. La banda de larguero 30 de la pala puede ser un laminado sólido de fibra de vidrio o una construcción en sándwich con fibra de vidrio o láminas frontales de fibra de carbono y un material de núcleo hecho con espuma, madera de balsa u otro material adecuado con alta resistencia a la compresión. La banda de larguero 30 está unida con adhesivo 28 a las tapas de larguero 26 para formar una viga en I. A veces, una segunda o incluso tercera banda de larguero está presente formando una viga de caja. Defectos tales como desuniones adhesivas o desuniones presentes en la unión adhesiva 28 de la tapa de larguero 26 a la banda de larguero 30 pueden conducir a un fallo catastrófico de la pala en servicio. Las ondas de fibra en el laminado de la tapa de larguero sólido 26 también pueden conducir a agrietamiento y finalmente al fallo de la pala. Además, las separaciones o grietas en el borde posterior 21 en la unión adhesiva 24 de la carcasa del lado de alta presión 16 y baja presión 14 pueden ser signos o una flexión excesiva de la pala durante la operación. La unión adhesiva 24 del borde posterior 21, en el área de la mayor anchura de la cuerda de la pala hacia el extremo de raíz 10 soporta cargas de torsión de la pala. Las grietas y roturas en la unión adhesiva 24 en estas ubicaciones también pueden conducir al fallo de la pala, a menos que se detecten a tiempo y la turbina se apague y se repare rápidamente.

45 La figura 3 es un gráfico que muestra el aumento de la presión de aire dentro de una pala de turbina de 50 m en función de la velocidad de rotación en rpm, sin incluir el efecto de la gravedad, que añadiría un término $(k)\cos\theta MG$ a la presión del aire, donde k es una constante que disminuye al aumentar las RPM de la turbina. M es la masa de aire dentro de la pala y G es la aceleración debida a la gravedad. La figura 3 representa la presión interna de la pala por encima del ambiente en la punta exterior de la pala de 50 metros de largo con una velocidad de rotación desde 12 a 21 rpm, sin tener en cuenta la presencia del orificio de drenaje de agua en la punta de la pala. Para una pala sellada, la reducción de presión por debajo del ambiente en el interior del mamparo del extremo de la raíz sería el negativo de estos valores.

La figura **4** muestra un esquema de la torre de turbina eólica **6**, con tres palas y un defecto **100**, situado en una pala a una distancia 104 del eje de la turbina **124**. El defecto gira en sentido horario (visto desde la parte delantera de la turbina) en un círculo **108** con un diámetro **104**. Al emitir un tono a la frecuencia **116**, la señal del defecto se desplaza Doppler a la frecuencia **118**, cuando se acerca al micrófono **122** en la base de la torre **6**. La frecuencia de la señal es un máximo alto cuando el defecto está en la posición **110**, en una línea **118**, tangente al círculo **108** y al micrófono **122**. Del mismo modo, la frecuencia mínima de la señal del defecto debido al desplazamiento Doppler es cuando está retrocediendo desde el micrófono **122** en la base de la torre **6**. La frecuencia de la señal se desplaza a un bajo mínimo **120**, cuando el defecto está en la posición **110**, en una línea tangente al círculo **108** y al micrófono **122**.

La figura **5** muestra la geometría similar a la figura **4**, pero para un defecto **150**, situado a una distancia más cercana **148** desde el eje de la turbina **136**. Debido a la distancia más corta **148**, que para el defecto **100**, la diferencia resultante entre los desplazamientos Doppler, **134** y **138** es significativamente menor.

La figura **6** muestra un espectrograma acústico de tres defectos emisores de sonido, uno cada uno en las tres palas de una turbina de 1,5 MW. El período **160** de la pala puede medirse por el tiempo entre las señales de frecuencia de pico repetidas **166** y **172**, desde el mismo defecto.

Las frecuencias desplazadas Doppler mínimas **164** y **170** y máximas **162** y **168** para dos de las señales de defectos se muestran y se puede medir con el espectrómetro.

Estos valores se pueden utilizar para calcular la localización del defecto a lo largo de la pala.

La figura 7 muestra un diagrama esquemático del equipo para realizar un ensayo espectral acústico de un conjunto de palas de turbina eólica. El sonido **178** ingresa al micrófono **122** que proporciona una señal a la tarjeta de sonido en el ordenador **182**. El sensor de temperatura **180** proporciona la lectura de la temperatura del aire al ordenador para determinar la velocidad del sonido en el aire en el sitio de la turbina. Este valor de temperatura también se puede ingresar manualmente. El espectrograma se muestra en el monitor **182** en tiempo real. Las palas con anomalías se pueden utilizar para activar manualmente, mediante control remoto, una cámara **188**, para capturar la luz que forma la imagen de los números de serie de la pala **186**. En otra realización, señales de tiempo de GPS pueden grabarse en la pista de sonido de una videocámara y también marcar temporalmente las señales desplazadas Doppler, para identificar la pala con el defecto. Se puede establecer otro disparador de cámara usando el espectrograma en tiempo real. El espectro puede detenerse y la pala con la señal de defecto identificada en la pantalla del ordenador usando un ratón o una función de pantalla táctil si está presente. El espectro se puede reiniciar adquiriendo nuevas señales usando la misma base de tiempo. El ordenador enviará una señal para disparar la cámara con el número de serie cada vez que esa pala entra en el campo de visión.

La figura **8** es un esquema para un equipo configurado con la inclusión de un reflector de disco parabólico **191**, para recibir señales **190** desde la maquinaria en el buje o góndola para su análisis. Este disco recibe señales desde un cono estrecho y se dirige utilizando la mira óptica **194**, que también puede ser una cámara de vídeo. Montado en un vehículo o trípode, este puede ser dirigido por control remoto utilizando unidades de motor en azimut y elevación. El disco **191** también se puede usar para detectar señales distantes desde cerca del buje de la turbina de defectos en las palas. Generalmente, las señales de las puntas de las palas pueden estar fuera del ángulo de sensibilidad del cono para el disco. Un disco **191** que tiene un micrófono extraíble **122** permitiría que se use un micrófono para las señales de defectos cercanos y lejanos.

La figura **9** es un espectrograma con una exploración de línea **196**, que muestra la intensidad del sonido **197**, a lo largo del tiempo a medida que las palas pasan por el micrófono **122**. La pantalla gráfica muestra que la intensidad del sonido es de valores de nivel de gris. El negro es ningún sonido, el blanco es la intensidad máxima medida. El gráfico de intensidad acústica **198** para una pala es considerablemente mayor que el gráfico **199** y **200** para las otras dos palas. La pala con el gráfico de intensidad **198** tenía un actuador de ángulo de inclinación de pala defectuoso. La pala no se ajustó para el ángulo de inclinación apropiado y el gráfico de sonido **198** fue el resultado de la turbulencia en el aire y el arrastre resultante, lo que disminuyó la eficiencia de la turbina. Las causas del ángulo de inclinación incorrecto pueden ser un fallo con el actuador de inclinación de la pala, el circuito de control o un cojinete de inclinación defectuoso de la pala.

El método de ensayo y el aparato descritos en el presente documento pueden usarse también para comprobaciones periódicas para detectar cambios en el espectrograma acústico, intensidad de la señal y desplazamiento Doppler de señales mediante las que se pueden determinar las localizaciones de los defectos. Además, el espectro acústico de los cojinetes del generador de turbina, reductores de engranajes, actuadores de inclinación de pala y otros componentes de maquinaria se pueden examinar para detectar cambios a lo largo del tiempo indicativos de deterioro o fallo del componente. Esta información es importante para la gestión óptima de activos de energía eólica, programación de mantenimiento o cierre de la turbina para evitar daños mayores, lesiones o incluso fallos catastróficos.

Debe entenderse, sin embargo, que a pesar de que numerosas características y ventajas de la presente invención se han expuesto en la descripción anterior, junto con detalles de la estructura y función de la invención, la

descripción es solamente ilustrativa, y se pueden hacer cambios en detalle, especialmente en cuestiones de forma, tamaño y disposición de las piezas dentro de los principios de la invención en toda la extensión indicada por el amplio significado general de los términos en los que se expresan las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias, que comprende:
 - un micrófono (122) posicionado aproximadamente en un plano de un disco de turbina en un punto por debajo del nivel más bajo de una punta (12) de una pala mientras gira, para recibir señales acústicas que emanan del aire que escapa por brechas en una línea de molde exterior de la pala desde un defecto interior o por debajo de la superficie en la pala; y
 - medios de análisis (182) para analizar las señales acústicas (178) así recibidas para detectar la presencia y la ubicación de un defecto potencial (100), relativo a un extremo de raíz (10) de la pala, en base al menos en parte a una diferencia entre las frecuencias desplazadas Doppler máxima (118) y mínima (120) de identificaciones de defectos de las señales acústicas recibidas.
2. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además un dispositivo que muestra un espectrograma.
3. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias, que comprende:
 - un micrófono (122) posicionado cerca de una turbina eólica giratoria y configurado para recibir señales de sonido emitidas por anomalías (100) en una pala de turbina eólica;
 - un dispositivo de grabación de señales (182) configurado para grabar las señales de sonido recibidas (178); y
 - medios de análisis (182) para analizar las señales de sonido así recibidas determinando las frecuencias desplazadas Doppler máxima y mínima de las señales de sonido recibidas y calculando la posición de las anomalías (100) en o sobre la pala de turbina eólica giratoria con respecto a un extremo de raíz (10) de la pala, en base, al menos en parte, en una diferencia entre las frecuencias desplazadas Doppler máxima (118) y mínima (120) de identificaciones de defectos.
4. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 3, en el que los medios de análisis están contruidos y dispuestos adicionalmente para medir el espectro acústico de la pala giratoria.
5. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 3, en el que los medios de análisis están contruidos y dispuestos adicionalmente para medir el nivel de sonido relativo de las emisiones acústicas a partir de cada pala durante la rotación para detectar cambios debidos a cambios en el perfil de la superficie de la pala.
6. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 3, en el que los medios de análisis están contruidos y dispuestos adicionalmente para medir cambios en el flujo de aire debido a defectos de estructura en la pala.
7. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 3, en el que los medios de análisis están contruidos y dispuestos adicionalmente para medir una cinta de protección de bordes delanteros faltante o pelada.
8. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 3, en el que los medios de análisis están contruidos y dispuestos adicionalmente para medir el daño a los materiales compuestos de las palas.
9. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 3, que comprende además una cámara para fotografiar números de serie de las palas.
10. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 9, en el que la cámara se activa mediante un software de espectrograma.
11. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 10, en el que la cámara está sincronizada con señales de GPS para identificar la pala con una anomalía detectada.
12. Un aparato para inspeccionar palas de turbinas eólicas giratorias de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el micrófono incluye un reflector parabólico y un dispositivo de apuntamiento óptico.
13. Un método para detectar una anomalía (100) en una pala de turbina eólica giratoria, que comprende las etapas de:
 - controlar emisiones acústicas (178) desde una pala de turbina eólica; y
 - realizar un análisis Doppler sobre las emisiones acústicas para identificar y localizar, en relación con un extremo de raíz (10) de la pala de turbina eólica, una anomalía (100) en la pala de turbina eólica, incluyendo el análisis

Doppler al menos una determinación de frecuencias Doppler desplazadas máxima (118) y mínima (120) de identificaciones de defectos.

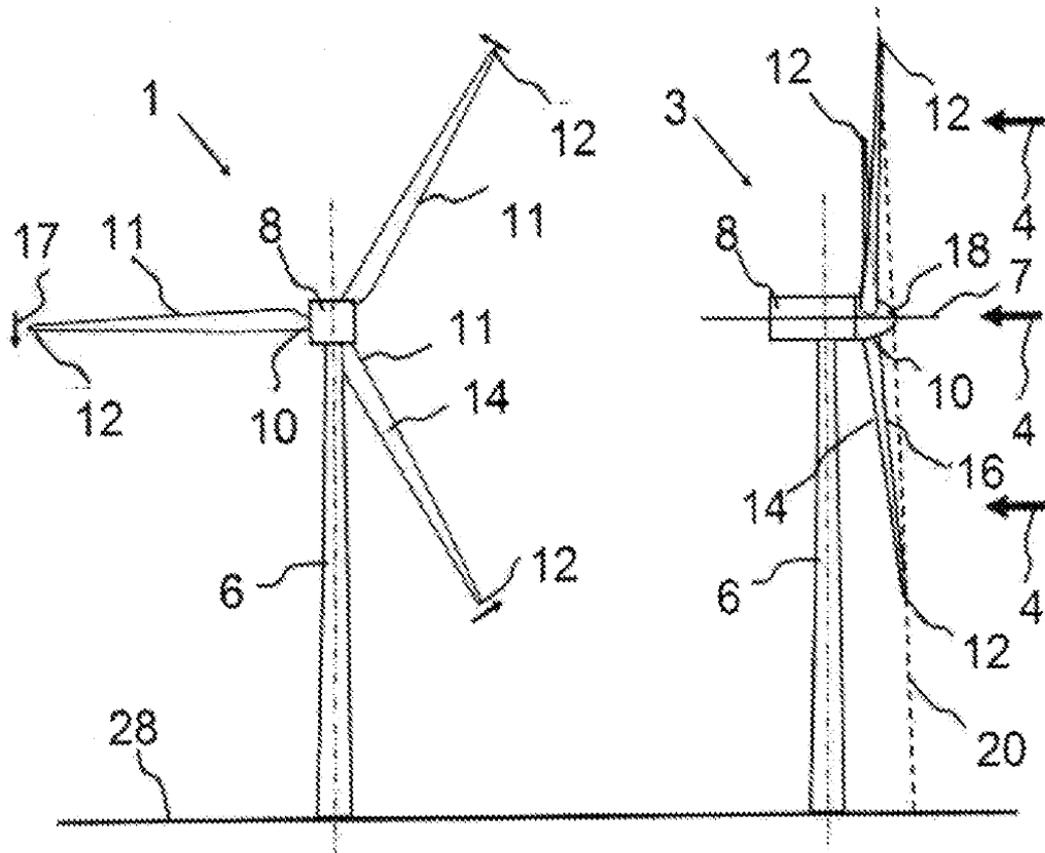


FIG. 1

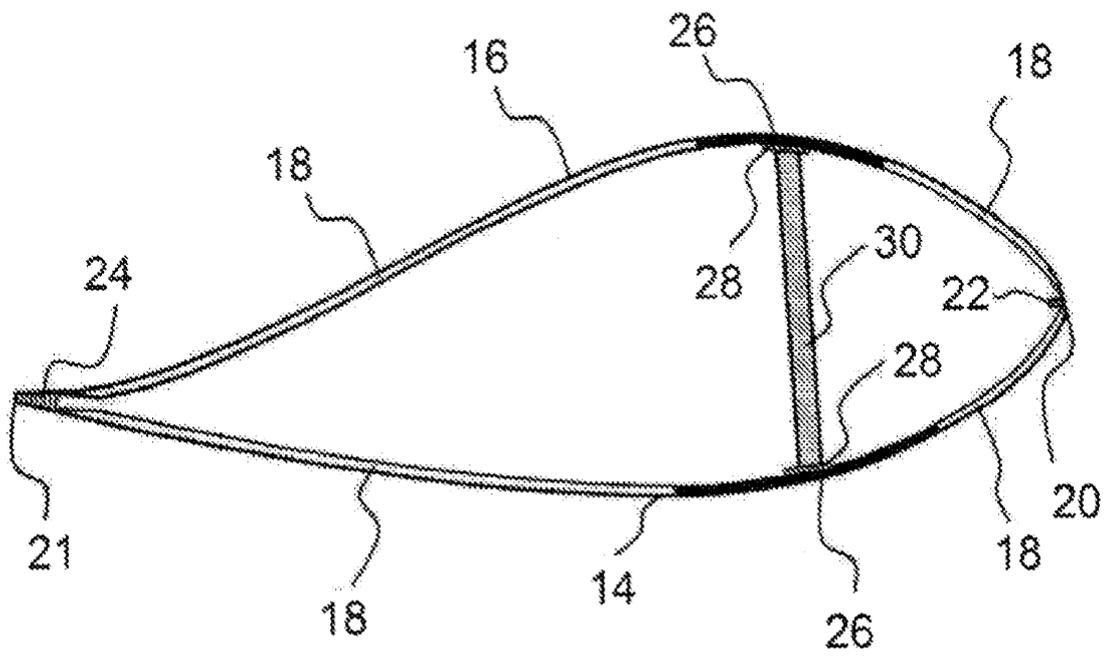


FIG. 2

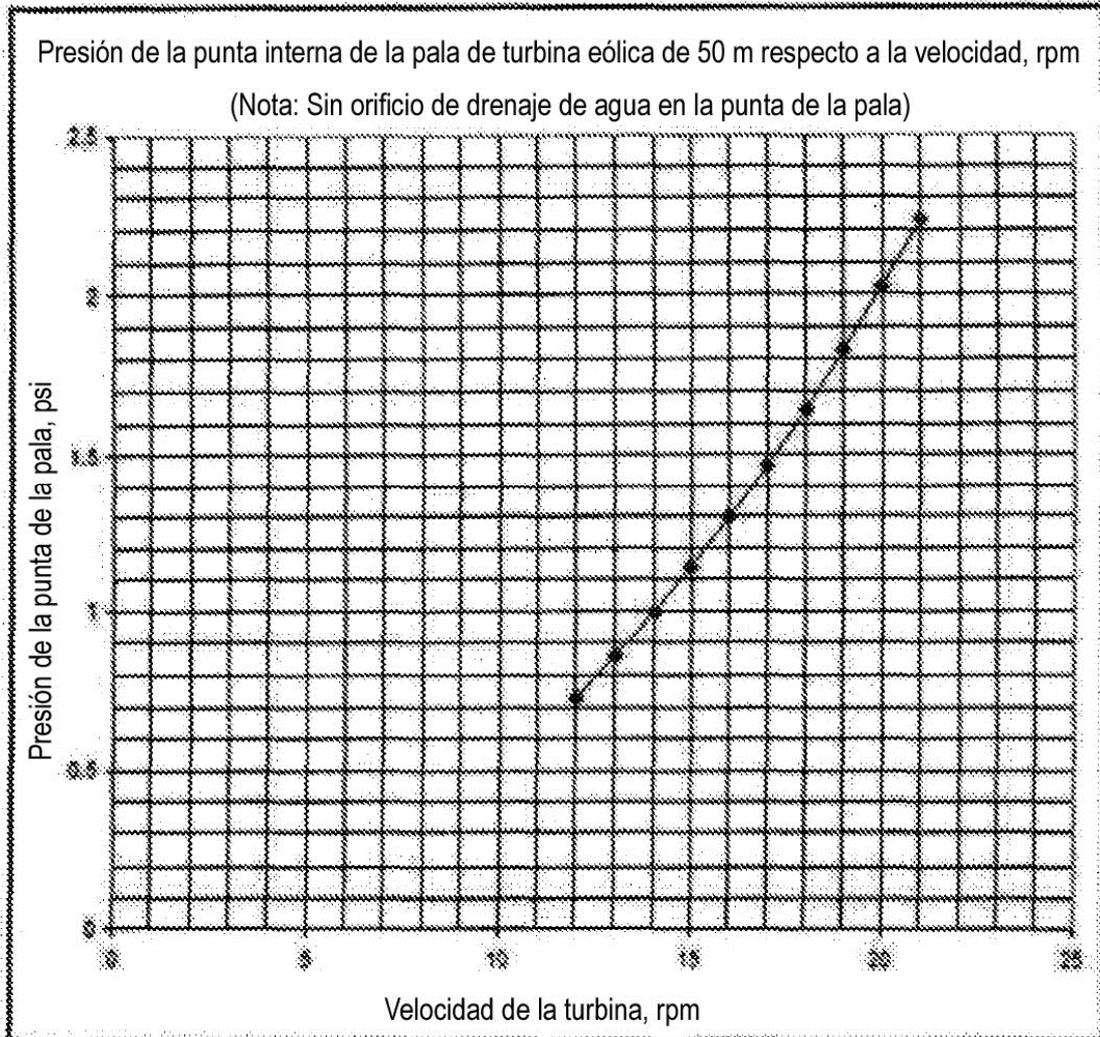


FIG. 3

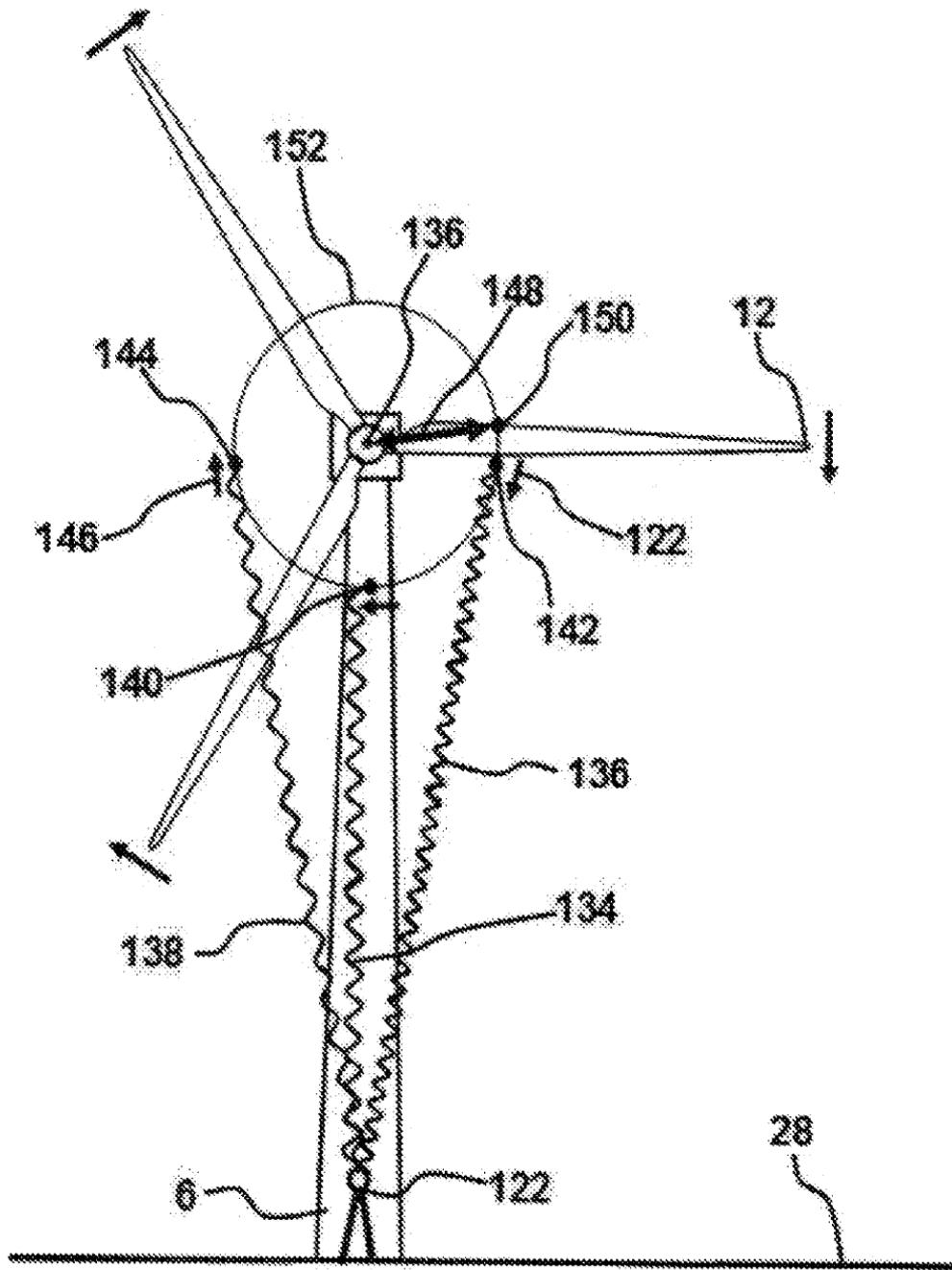


FIG. 5

Análisis espectral acústico de señales desplazadas Doppler desde grietas de la pala de turbina eólica

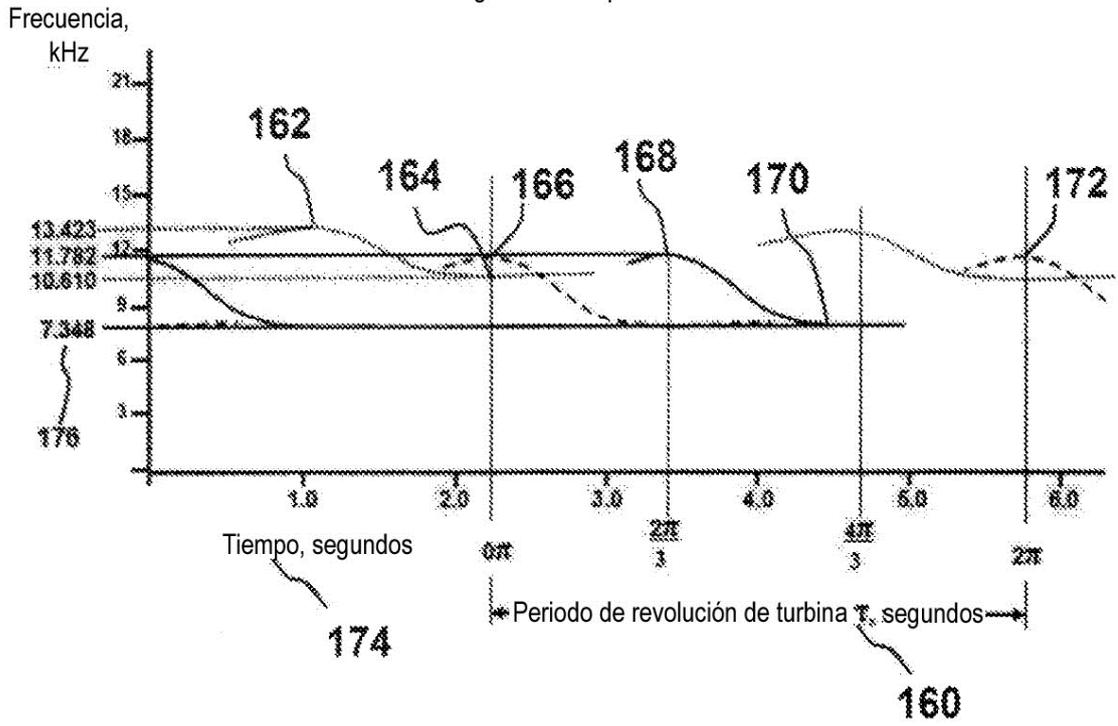


FIG. 6

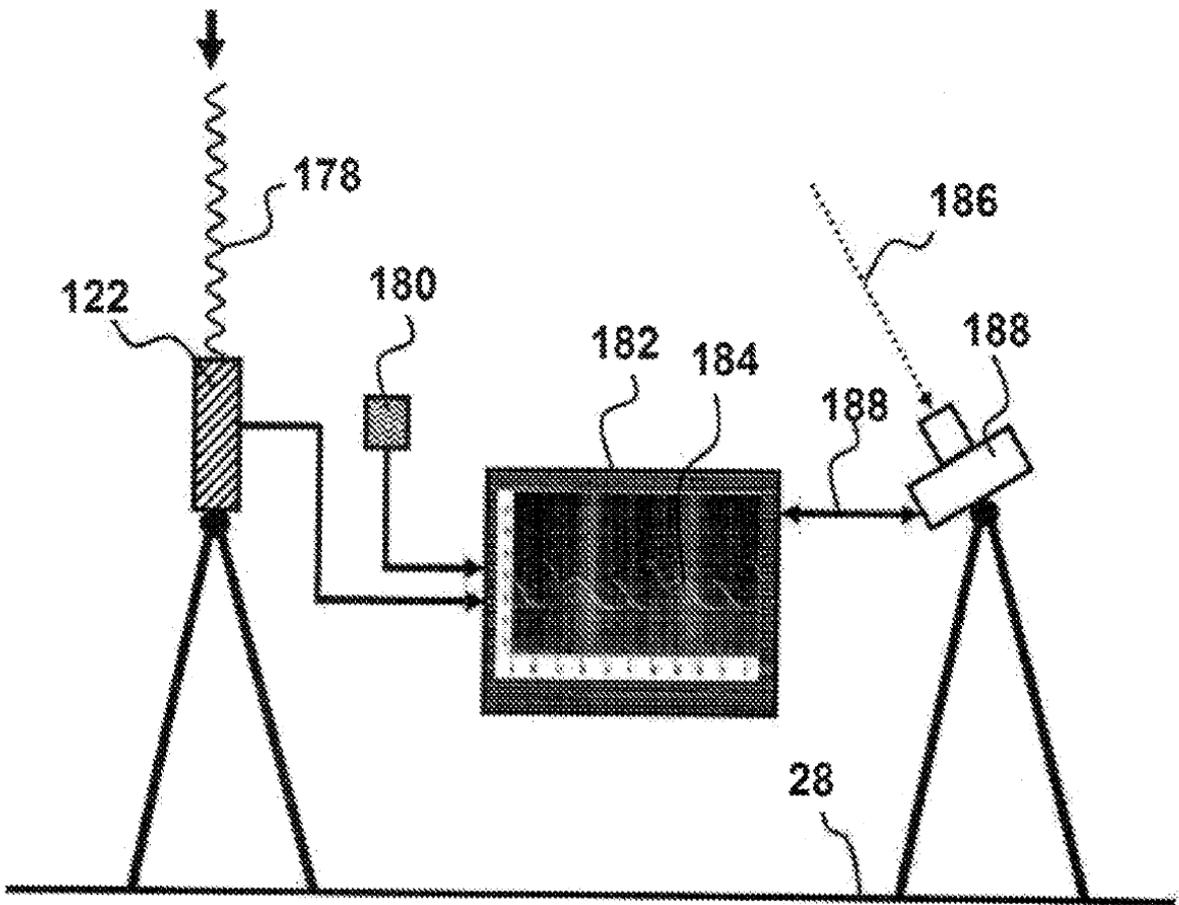


FIG. 7

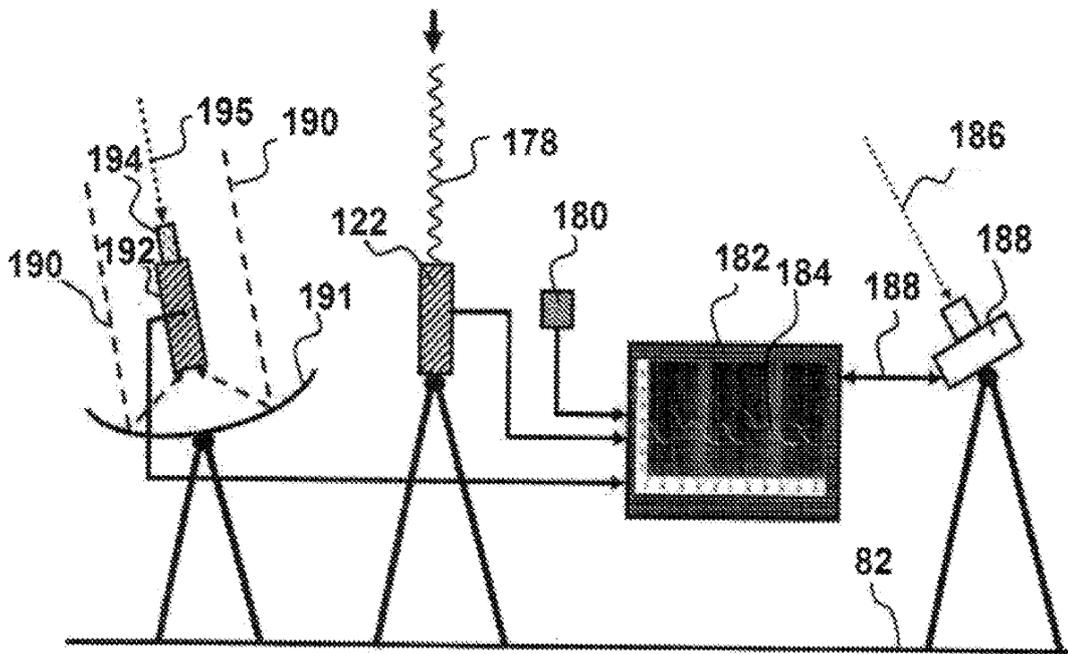


FIG. 8

Diagrama de intensidad acústica para un conjunto de palas de turbina eólica

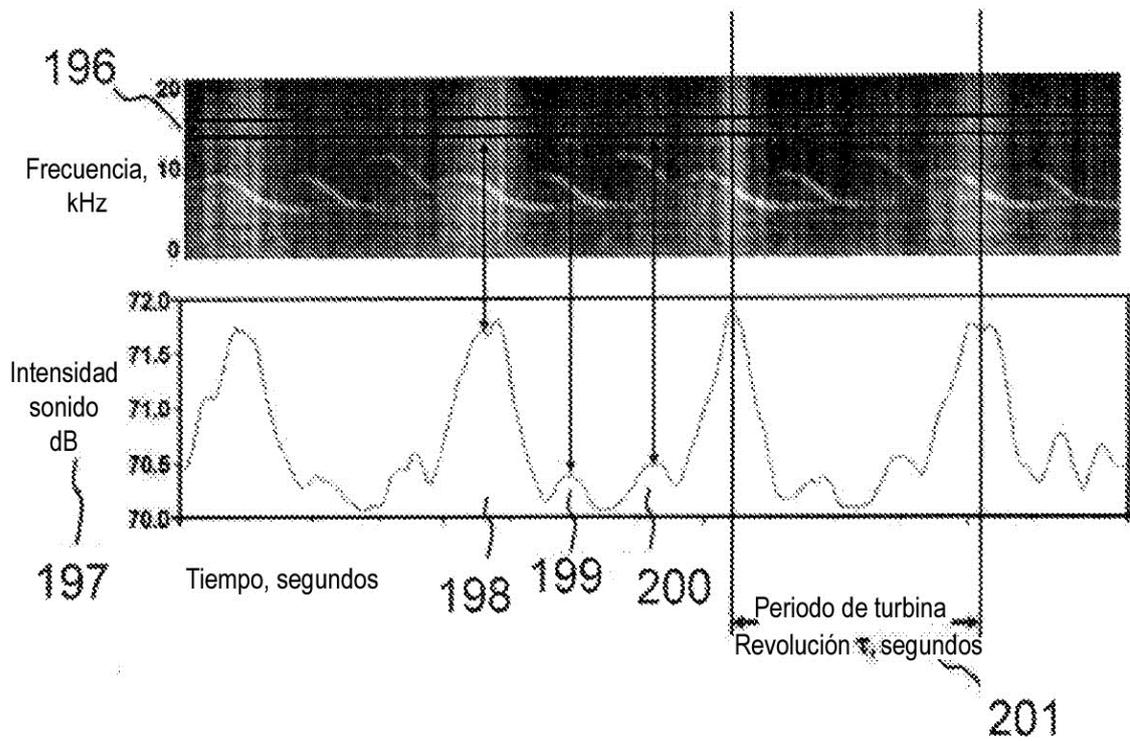


FIG. 9