



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 376 815**

21 Número de solicitud: 200803726

51 Int. Cl.:  
**F03D 7/02** (2006.01)  
**F03D 11/00** (2006.01)  
**G01M 1/16** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación: **29.12.2008**

43 Fecha de publicación de la solicitud: **20.03.2012**

43 Fecha de publicación del folleto de la solicitud:  
**20.03.2012**

71 Solicitante/s: **ACCIONA WINDPOWER, S.A.**  
**Avda. Ciudad de la Innovación, nº 5**  
**31621 Sarriguren, Navarra, ES**

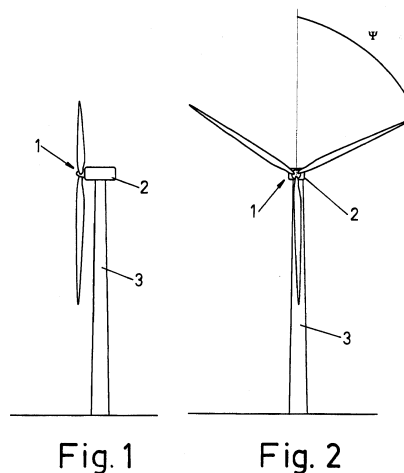
72 Inventor/es: **Tonks, Stephen;**  
**García Barace, Alberto;**  
**Huarte Amezqueta, Ana;**  
**Sanz Corretge, Francisco Javier;**  
**Egaña Santamarina, Igor;**  
**Azanza Ladrón, Eduardo;**  
**García Sayés, José Miguel y**  
**Núñez Polo, Miguel**

74 Agente/Representante:  
**Ungría López, Javier**

54 Título: **Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador.**

57 Resumen:

Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, que consta de una torre (3), una nacelle (2) y un rotor (1) compuesto por varias palas, girando dicho rotor respecto de un eje substancialmente horizontal orientado en la dirección del viento, pudiendo tener desequilibrio aerodinámico y másico, para cuya evaluación comprende las etapas de hacer funcionar al aerogenerador a un régimen de producción de potencia substancialmente menor que su potencia nominal; de obtener unas señales indicativas de las cargas en el aerogenerador mediante sensores localizados en la nacelle (2) y/o la torre (3), o mediante parámetros operacionales de la turbina; de calcular en dichas señales indicativas de carga en el aerogenerador al menos una magnitud (13) del armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor; comparar la magnitud (13) del armónico 1p con un umbral preestablecido, y; de decidir que existe un desequilibrio másico en el rotor (1) si dicha magnitud supera el citado umbral.



## DESCRIPCIÓN

Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador.

### 5 Objeto de la invención

La presente invención, según se expresa en el enunciado de la presente memoria descriptiva, se refiere a un método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, teniendo por objeto detectar el desequilibrio en el rotor del aerogenerador y analizar la naturaleza del mismo.

Así, un primer objeto de la invención es proporcionar un método para detectar si existe desequilibrio y para discriminar si el equilibrio es másico o aerodinámico.

Un segundo objeto de la invención es establecer un cálculo del desequilibrio según su origen.

Un tercer objeto de la invención es proporcionar un método de operación para compensar dicho desequilibrio, eliminándose de forma efectiva las consecuencias de este efecto sobre las cargas mecánicas y sobre la producción energética.

### 20 Campo de aplicación

En la presente memoria se describe un método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, de aplicación en todos aquellos aerogeneradores que constan de una torre, una nacelle y un rotor compuesto por varias palas y girando dicho rotor respecto de un eje substancialmente horizontal orientado en la dirección del viento.

### 25 Antecedentes de la invención

La fabricación de palas de aerogenerador se realiza mediante técnicas que conjugan procedimientos automáticos y manuales. Esto puede dar lugar a cierta dispersión en el acabado final de los perfiles de una pala a otra, así como en la masa y distribución de la misma a lo largo de su eje longitudinal.

Estas tolerancias pueden provocar que el rotor montado en un aerogenerador no esté completamente equilibrado tanto desde un punto de vista aerodinámico, como desde un punto de vista másico.

Dichos efectos de desequilibrio pueden darse además por otros motivos, tales como la degradación de las palas, la aparición de hielo causado por las condiciones meteorológicas o por un montaje incorrecto de la pala o del sistema de actuación de paso de pala.

De esta forma, la contribución de cada pala sobre las cargas del aerogenerador puede no ser uniforme debido a causas no deseadas, tales como un incorrecto montaje de la pala o del sistema de actuación sobre el ángulo de paso, según el cual al menos una de ellas presenta un ángulo de calado distinto al deseado, o debidas a las tolerancias de fabricación entre las distintas palas. Esto puede provocar cargas de fatiga de tipo aerodinámico que acortan la vida del aerogenerador, y que pueden causar además una merma en la producción de energía. Este tipo de efectos se conocen como desequilibrio aerodinámico.

Además, el proceso de fabricación de las palas puede también producir cierta dispersión en la masa de la pala, o al menos, en su distribución másica a lo largo de su eje longitudinal, dando lugar a desequilibrios del rotor de tipo másico. Esto también causa cargas de fatiga mayores, lo que provoca una reducción de la vida del aerogenerador.

Igualmente, también es posible que el desequilibrio másico o aerodinámico se den en un rotor como consecuencia de la degradación de las palas (rotura parcial o total de elementos estructurales, suciedad, impacto de aves, etc.), o la adición de hielo producido por ciertas condiciones ambientales transitorias.

El desequilibrio aerodinámico y másico pueden darse simultáneamente, superponiéndose el efecto producido por ambos, lo que dificulta la distinción de la fuente del desequilibrio.

Además, es imprescindible conocer la causa del desequilibrio ya que las acciones correctoras para corregir un desequilibrio son totalmente distintas si el desequilibrio es másico o aerodinámico.

Así, por ejemplo, un desequilibrio másico no motivado por la presencia de hielo se corrige añadiendo masa en el rotor en la posición adecuada. Sin embargo si el desequilibrio es aerodinámico y está provocado por un incorrecto montaje de la pala, se corrige variando el ángulo de calado de dicha pala o realizando un nuevo montaje del rotor.

Un rotor desequilibrado, sea su desequilibrio de origen másico o aerodinámico, se traduce en cargas en el aerogenerador que fluctúan según la frecuencia de giro del rotor, frecuencia conocida como 1p.

Igualmente, las señales indicativas de las cargas también pueden provenir de otras magnitudes generales que pueden ser consideradas como parámetros operacionales, tales como la velocidad de giro del tren de potencia, o la potencia generada.

5 Existe una relación entre las cargas sobre el aerogenerador, y los movimientos que provocan dichas cargas en algunos componentes. Así por ejemplo, determinadas cargas provocan movimientos de la nacelle y de la parte superior de la torre en la dirección del eje de rotación del rotor. Por otra parte, otro tipo de cargas producen movimientos de la nacelle, y de la parte superior de la torre contenidos en planos perpendiculares al eje de giro del rotor.

10 La patente DE19628073 contempla la detección y compensación del desequilibrio aerodinámico a partir de la contribución de cada pala sobre la variación de potencia en el dominio del tiempo y su compensación. Dicha compensación se hace modificando el ángulo de paso de pala en un sentido cualquiera y midiendo la consecuencia de dicha modificación en las variables estudiadas.

15 La patente US7086834B2 describe la detección de desequilibrio másico motivado por hielo a partir de diferentes parámetros operativos de la turbina y las condiciones meteorológicas.

Por otra parte, la patente US6525518B1 contempla la medición de las oscilaciones de aerogeneradores basándose en el análisis del espectro de potencia de señales de cargas, y su atenuación basada en el sistema de control. Este método de operación no considera la distinción del origen que causa las oscilaciones ni su localización exacta en el rotor. En otro aspecto de la invención dicha patente contempla la actuación del sistema de control para la reducción de las oscilaciones mediante medidas de reducción parcial o total de la producción.

25 El artículo Mass and aerodynamic imbalance of a horizontal axis wind turbine (Borj & Kirchhoff, 1998, ASME Journal of Solar Energy Engineering, 120, 66-74) describe la superposición de los efectos provocados por los desequilibrios aerodinámico y másico en los armónicos 1p y múltiplos de diferentes parámetros de operación de la turbina.

30 Por último el artículo Rotor Condition Monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters (Caselitz & Giebhardt, 2004, Institut für Solare Energieversorgungstechnik) describe la discriminación de los desequilibrios aerodinámicos y másicos mediante el análisis de la señal obtenida con múltiplos acelerómetros, comprendiendo dicho método el cálculo de las componentes 1p de dichas señales, calculadas respecto a la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor.

## Descripción de la invención

35 En la presente memoria se describe un método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, constando dicho aerogenerador de una torre, una nacelle y un rotor compuesto por varias palas y girando dicho rotor respecto de un eje substancialmente horizontal orientado en la dirección del viento, siendo dicho rotor susceptible de tener desequilibrio aerodinámico y másico, de forma que dicho método comprende las siguientes etapas:

- 40 • hacer funcionar al aerogenerador a un régimen de producción de potencia substancialmente menor que su potencia nominal;
- obtener unas señales indicativas de las cargas en el aerogenerador mediante sensores localizados en la nacelle y/o la torre, o mediante parámetros operacionales de la turbina;
- 45 • calcular en dichas señales indicativas de cargas en el aerogenerador al menos una magnitud del armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor;
- 50 • comparar la magnitud del armónico 1p con un umbral preestablecido, y;
- decidir que existe un desequilibrio másico en el rotor si dicha magnitud supera el citado umbral.

55 Como ya se ha descrito, los efectos del desequilibrio másico y del aerodinámico se superponen sobre el aerogenerador. Por ello, según el estado de la técnica para detectar el desequilibrio en el rotor y discriminar su origen era necesario la utilización de múltiples sensores.

60 En la presente invención se buscan condiciones en que alguno de los efectos sea despreciable en comparación con el otro para poder tratarlos por separado según corresponde a su origen. La presente invención proporciona así un método simplificado para detectar si existe desequilibrio y para discriminar si el desequilibrio es másico o aerodinámico.

65 El efecto del desequilibrio másico predomina sobre el del aerodinámico cuando el aerogenerador trabaja a un régimen de producción de potencia substancialmente menor que su potencia nominal. Por lo tanto, en dicho régimen de funcionamiento puede analizarse el desequilibrio másico, independientemente, de si existe también un posible desequilibrio aerodinámico, motivado, por ejemplo, por un incorrecto montaje de palas. Para ello, únicamente es necesaria una única señal indicativa de cargas.

## ES 2 376 815 A1

En la presente invención se usan señales indicativas de dichas cargas, que pueden ser tanto medidores de deformación (galgas extensométricas), medidores de desplazamiento (acelerómetros) o parámetros indicadores de carga en el tren de potencia (par o potencia). Cualquier otro tipo de sensor que proporcione medidas indicativas de las cargas en el aerogenerador puede ser también utilizado. Dichos sensor o sensores pueden estar situados en la nacelle y/o en la torre del aerogenerador, por lo que este método de operación es susceptible de ser aplicado fácilmente en turbinas instaladas previamente en campo.

En una realización preferente, la invención se aplica cuando el viento es lo bastante bajo como para que el aerogenerador funcione en la zona de velocidad mínima constante.

Según dicha realización preferente y en otro aspecto de la invención se utiliza la potencia generada como señal indicativa de las cargas en el aerogenerador. Puesto que la potencia generada es un valor conocido en cualquier aerogenerador, según dicha realización preferente no es necesario disponer de ningún sensor adicional para conocer si el rotor presenta un desequilibrio másico aún en el caso de que exista también un desequilibrio aerodinámico en dicho rotor.

Otro objeto de la invención es proporcionar un método para cuantificar y compensar el desequilibrio másico. Un desequilibrio másico en un rotor puede solucionarse colocando una masa a un radio y una posición angular determinada. Fijado el radio, a la masa necesaria para obtener la compensación se le da el nombre de “masa equivalente” y a la posición angular en que debe colocarse se le conoce como “posición angular equivalente”. El interior de las palas es el sitio más indicado para añadir masas a un rotor. En el caso de que la posición angular equivalente no coincida exactamente con la de una pala, será necesario calcular la masa a colocar en cada una de las palas contiguas a dicha posición equivalente para obtener la compensación del desequilibrio.

Así en otro aspecto de la invención, en el caso de existir desequilibrio másico, se estima la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) necesaria para compensar dicho efecto en un radio ( $r_{EQ}$ ) determinado del rotor a partir de la magnitud del armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) y la velocidad de giro del rotor.

En una primera alternativa de la invención a partir de la fase del armónico 1p se calcula la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ) en que habría que situar dicha masa equivalente ( $m_{EQ}$ ). A continuación se calcula, a partir de la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) y la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ), la masa ( $m_{EQ1}$ ,  $m_{EQ2}$ ) a colocar en las palas contiguas a dicha posición equivalente.

Al contrario que un rotor básicamente equilibrado, un rotor que presenta un desequilibrio másico descansa en reposo en una posición fija tal que su centro de masas está en la posición más baja posible. Por ello en una segunda alternativa de la invención se calcula a partir de la posición azimutal ( $\Psi$ ) que muestra el rotor en reposo la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ) en que habría que situar dicha masa equivalente ( $m_{EQ}$ ). Posteriormente se calcula, a partir de la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) y la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ), la masa ( $m_{EQ1}$ ,  $m_{EQ2}$ ) a colocar en las palas contiguas a dicha posición equivalente.

En otro objeto de la invención, una vez se ha verificado que no hay desequilibrio másico, se buscan condiciones en que el efecto del desequilibrio aerodinámico sea apreciable. Para ello dicho método comprende las siguientes etapas adicionales:

- hacer funcionar al aerogenerador a un régimen de producción de potencia próximo a su potencia nominal;
- obtener unas señales indicativas de las cargas en el aerogenerador mediante sensores localizados en la nacelle y/o la torre, o mediante parámetros operacionales de la turbina;
- calcular en dichas señales indicativas de cargas en el aerogenerador al menos una magnitud del armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor;
- comparar la magnitud del armónico 1p con un segundo umbral preestablecido, y;
- decidir que existe un desequilibrio aerodinámico en el rotor si dicha magnitud supera el citado umbral.

En otro objeto de la invención, en el caso de existir desequilibrio aerodinámico, se decide a partir de la fase del armónico 1p de las señales indicativas de cargas en el aerogenerador cuál es la pala o palas que originan el desequilibrio.

En una realización preferida de la invención las señales indicativas de las cargas en el aerogenerador proceden de la medida de acelerómetros.

En otro aspecto de la invención, en el caso de existir desequilibrio aerodinámico, se estima el ángulo que hay que corregir en una o varias palas para compensar dicho efecto a partir de:

- la magnitud de dicho armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ), y;

## ES 2 376 815 A1

- la relación previamente obtenida, experimentalmente o mediante simulaciones, entre dicha magnitud  $1p$  y el ángulo de error en el posicionamiento de una pala.

5 En otro objeto de la invención, se compensa el desequilibrio aerodinámico corrigiendo el ángulo de calado en, al menos, una pala del rotor.

En otro aspecto de la invención, la compensación del desequilibrio aerodinámico se hace mediante una corrección puntual del ángulo de calado de una o varias palas aplicado por el programa de control, o bien alternativamente, mediante la compensación puede hacerse mediante un nuevo montaje de una o varias palas en el buje.

En otro aspecto de la invención se descarta que las condiciones ambientales han podido permitir la formación de hielo. La acumulación de hielo en las palas puede ser una de las causas de desequilibrio aerodinámico o másico.

15 A diferencia de otras causas que motivan desequilibrios, esta un situación transitoria que requiere la adopción de medidas distintas a las descritas en la presente invención. Por esa razón en otro objeto de la invención se utiliza la medida de temperatura ambiente para descartar el hielo como origen del desequilibrio.

En otro aspecto de la invención el método descrito anteriormente se aplica sistemáticamente en la puesta en marcha de cada aerogenerador tras su instalación, verificándose de esta manera que el juego de palas montado tiene su distribución de masas equilibrado, aerodinámicamente son similares y el montaje de la palas ha sido correcto.

### Breve descripción de los diseños

25 Las figuras 1 y 2, muestran la topología típica de un aerogenerador, constando de una torre, una nacelle y un rotor compuesto por varias palas.

Las figuras 3 y 4, muestran los componentes principales de la nacelle, según una vista en alzado y otra en planta.

30 Figura 5. Muestra una gráfica de una señal indicativa de cargas en el dominio de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor.

Figura 6. Muestra una gráfica de una curva estacionaria de par eléctrico en función de la velocidad de giro del rotor.

35 Figura 7. Muestra la distribución de masas en un rotor y la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) necesaria para compensar un desequilibrio másico.

Figura 8. Muestra el reparto de una masa equivalente en las palas contiguas a la posición equivalente.

40 Figura 9. Muestra un rotor desequilibrado básicamente en reposo.

### Descripción de una realización preferente

En las Figuras 1 y 2 se muestra un aerogenerador, constando dicho aerogenerador de una torre 3, una nacelle 2 y un rotor 1 compuesto por varias palas y girando dicho rotor respecto de un eje substancialmente horizontal, de modo que varía la posición azimutal ( $\Psi$ ) de dicho rotor.

En las Figura 3 y 4 se ilustran los componentes principales de la nacelle desde una vista lateral y una vista superior, respectivamente, de forma que el citado rotor del aerogenerador gira alrededor de un eje 6 substancialmente horizontal compuesto principalmente por un buje 4, un eje 5 de baja velocidad, una multiplicadora 7 y un generador eléctrico 8 que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

El conjunto está sustentado por un bastidor 9, en el que se instalan uno o varios acelerómetros 10. El eje de giro 6 del conjunto de tren de potencia presenta infinitos planos perpendiculares, siendo el plano 11 uno de ellos y habiendo representado con la referencia 12 un eje horizontal contenido en dicho plano.

La Figura 5 muestra una señal indicativa de cargas en el dominio de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor 1 y el armónico fundamental, tradicionalmente conocido como el armónico  $1p$ , calculado en función de dicha variable, caracterizado por una onda sinusoidal dada por una magnitud 13 y una fase 14. Aunque, podrían obtenerse armónicos de frecuencias múltiplos enteros del armónico  $1p$ , obteniéndose su magnitud y su fase, la presente invención se centra en el uso de la componente fundamental.

Dicha señal indicativa de cargas se obtuvo con un acelerómetro 10 situado en la nacelle. Podrían obtenerse señales parecidas con otro tipo de sensores como, por ejemplo, galgas extensométricas o con parámetros operacionales de la turbina como, por ejemplo, la potencia.

La Figura 6 ilustra una curva estacionaria de par eléctrico demandado al generador eléctrico en función de la velocidad de giro del rotor, comandada por el sistema de control para el caso particular de un aerogenerador de

## ES 2 376 815 A1

5 velocidad variable. En dicha curva, existe una zona 15 de velocidad mínima constante en que la velocidad de giro del aerogenerador se mantiene substancialmente constante mediante la adecuada modulación del par demandado al generador eléctrico, una zona 16 de velocidad variable en que típicamente se demanda un par eléctrico al generador eléctrico para maximizar el rendimiento aerodinámico y una zona de velocidad nominal constante 17, en que se modula el par eléctrico demandado al generador eléctrico de modo análogo a la zona de velocidad mínima constante, hasta alcanzar la potencia nominal.

10 En una realización preferente de la invención, se hace funcionar el aerogenerador en un régimen de producción de potencia substancialmente menor que su potencia nominal, que en el caso de aerogeneradores de velocidad variable, se trata de la zona de funcionamiento de velocidad mínima constante 15.

15 En dichas condiciones de funcionamiento se determina el armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor a partir de la señal de potencia generada. La magnitud de dicha componente es mayor cuanto mayor sea el desequilibrio másico que presente dicho rotor. Cuando dicha magnitud rebasa un umbral precalculado se decide que el rotor presenta un desequilibrio másico relevante.

20 En la figura 7 se muestra la distribución de masas de un rotor. Cada pala A, B y C presentan una masa  $m_A$ ,  $m_B$  y  $m_C$  y un centro de masas situado a una distancia del eje del rotor  $r_A$ ,  $r_B$  y  $r_C$  respectivamente.

Un rotor está equilibrado en cada uno de los ejes X e Y si el centro de masas coincide con el eje del rotor:

$$\text{Eje X: } m_A * r_A + m_B * r_B * \cos(120^\circ) + m_C * r_C * \cos(240^\circ) = 0$$

$$\text{Eje Y: } m_B * r_B * \sin(120^\circ) + m_C * r_C * \sin(240^\circ) = 0$$

30 En caso contrario será necesario colocar una masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) a un radio determinado ( $r_{EQ}$ ) en un ángulo equivalente determinado ( $\alpha_{EQ}$ ), de modo que se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$\text{Eje X: } m_{EQ} * r_{EQ} * \cos(\alpha_{EQ}) + m_A * r_A + m_B * r_B * \cos(120^\circ) + m_C * r_C * \cos(240^\circ) = 0$$

$$\text{Eje Y: } m_{EQ} * r_{EQ} * \sin(\alpha_{EQ}) + m_B * r_B * \sin(120^\circ) + m_C * r_C * \sin(240^\circ) = 0$$

35 La ausencia de la masa equivalente para el equilibrado origina un momento en el rotor que en valor absoluto coincide con el producto entre la masa equivalente y el radio:

$$40 \quad T = m_{EQ} * r_{EQ} * g$$

45 El producto ( $m_{EQ} * r_{EQ}$ ) puede estimarse con el cociente entre la magnitud (13) de la componente 1p de la potencia ( $P_{1P}$ ) generada y la velocidad de giro ( $\Omega_{min}$ ) del rotor:

$$m_{EQ} * r_{EQ} = P_{1P} / (\Omega_{min} * 2 * g)$$

50 Para el cálculo del umbral se establece un producto ( $m_{EQ} * r_{EQ}$ )<sub>umbral</sub> a partir del cual se decide que el desequilibrio es relevante. Cuando el cociente entre la componente 1p de la potencia generada y la velocidad de giro del rotor, que es ( $\Omega_{min}$ ) en la zona de velocidad mínima constante (15), supera dicho umbral, se decide que el desequilibrio es relevante. En ese caso se adoptarán medidas para compensarlo.

55 A partir del producto ( $m_{EQ} * r_{EQ}$ ) estimado, puede decidirse la distancia ( $r_{EQ}$ ) y la masa ( $m_{EQ}$ ) que cumplan dicho producto y sean más convenientes. Para ello se tendrá en cuenta entre otros factores el espacio disponible en el interior de la pala, sus características estructurales, la accesibilidad y el peso total resultante del rotor.

60 En una primera realización preferente la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ) se calcula a partir de la fase (14) de la componente 1p de la potencia generada. Los valores máximos y mínimos de dicha componente 1p corresponden a posiciones en que la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) necesaria estaría a la altura del eje del rotor.

65 En una segunda realización preferente, la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ) se estima a partir de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor en reposo. Un rotor desequilibrado en reposo descansa siempre en la misma posición, que coincide con aquella en el que centro de masas está más bajo. La posición correspondiente a la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) es la opuesta, aquella en que dicha masa ocupa la posición más elevada, tal como indica la figura 9.

## ES 2 376 815 A1

Puesto que el sitio más indicado para colocar las masas para corregir el desequilibrio es en el interior de las palas, es necesario calcular unas masas ( $m_{EQ1}$ ,  $m_{EQ2}$ ) a colocar en cada una de las palas contiguas a la posición equivalente para conseguir el mismo efecto de compensación. Si tal como muestra la figura 8, la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ) es tal que las palas contiguas son la pala B y la C, las masas se calcularían según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Eje X: } m_{EQ} * r_{EQ} * \cos(\alpha_{EQ}) = m_{EQ1} * r_{EQ} * \cos(120^\circ) + m_{EQ2} * r_{EQ} * \cos(240^\circ) = 0$$

$$\text{Eje Y: } m_{EQ} * r_{EQ} * \sin(\alpha_{EQ}) = m_{EQ1} * r_{EQ} * \sin(120^\circ) + m_{EQ2} * r_{EQ} * \sin(240^\circ) = 0$$

Una vez se ha compensado el desequilibrio másico o se ha verificado que no existe, según una realización preferente, en un régimen de funcionamiento próximo a la potencia nominal, se obtiene la medida de un acelerómetro 10 que mide el movimiento de la nacelle en la dirección del eje 6 de giro del rotor. De dicha señal se extrae la magnitud 13 del armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor 1 a partir de las muestras tomadas durante cierto período de tiempo. Dicha magnitud 13 es mayor cuanto mayor es el desequilibrio aerodinámico. Cuando la citada magnitud 13 supera un umbral preestablecido se decide que el rotor presenta un desequilibrio aerodinámico relevante.

Mediante experimentos o simulaciones informáticas puede deducirse la relación entre los errores en el posicionamiento de las palas y la magnitud de la componente 1p de las señales de indicativas de cargas (en una realización preferente un acelerómetro). Conocida dicha relación puede por un lado fijarse el umbral a partir del cual se decide que hay desequilibrio aerodinámico y, por otro, para una magnitud dada estimarse el ángulo de error de posicionamiento que lo origina.

También mediante experimentos o simulaciones puede provocarse desequilibrios sucesivamente en cada una de las palas, obteniéndose el patrón de fases correspondientes al armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor. Conocido dicho patrón a partir de la fase 14 del armónico 1p puede deducirse la pala o palas que originan el desequilibrio. Dicha fase puede coincidir con la fase del armónico 1p creado sobre el desequilibrio aerodinámico por una de las palas, o bien con el ángulo opuesto, lo que indica el sentido de giro necesario para compensar con precisión el desequilibrio aerodinámico. La magnitud 13 del armónico 1p, por otra parte, se relaciona con el ángulo de paso de pala necesario para compensar el desequilibrio. Si la fase 14 detectada en el armónico 1p no coincidiera con la fase relacionada con una sola de las palas, se pueden determinar los movimientos equivalentes de ángulo de paso de varias palas, para compensar el desequilibrio aerodinámico.

Como se ha señalado, la compensación del desequilibrio aerodinámico se realiza cambiando el ángulo de calado de una o varias de las palas del rotor 1. Cuando se detecta un desequilibrio aerodinámico, inicialmente se procede a realizar una corrección del ángulo de calado de una o varias palas por medio de un cambio puntual desde el programa de control. En una realización preferente dicho cambio es puntual, realizándose de manera esporádica los cambios descritos en el ángulo de calado de las palas. Posteriormente, cuando por otros condicionantes es posible, se realiza un nuevo montaje del rotor que elimina definitivamente el desequilibrio de montaje proporcionando consignas de ángulo de paso idénticas a todas las palas.

En una realización preferente se utiliza la medida de la temperatura para descartar el hielo como origen del desequilibrio.

## REIVINDICACIONES

5 1. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, constanding dicho aerogenerador de una torre (3), una nacelle (2) y un rotor (1) compuesto por varias palas y girando dicho rotor respecto de un eje substancialmente horizontal orientado en la dirección del viento, siendo dicho rotor susceptible de tener desequilibrio aerodinámico y másico, **caracterizado** porque la evaluación del desequilibrio del rotor comprende las siguientes etapas:

- 10 • hacer funcionar al aerogenerador a un régimen de producción de potencia substancialmente menor que su potencia nominal;
- obtener unas señales indicativas de las cargas en el aerogenerador mediante sensores localizados en la nacelle (2) y/o la torre (3), o mediante parámetros operacionales de la turbina;
- 15 • calcular en dichas señales indicativas de cargas en el aerogenerador al menos una magnitud (13) del armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor;
- comparar la magnitud (13) del armónico 1p con un umbral preestablecido, y;
- 20 • decidir que existe un desequilibrio másico en el rotor (1) si dicha magnitud supera el citado umbral.

25 2. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque dicho método se aplica cuando el viento es lo bastante bajo para que el aerogenerador funcione en la zona de velocidad mínima constante (13).

30 3. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 2, **caracterizado** porque se utiliza la potencia generada como señal indicativa de las cargas en el aerogenerador.

35 4. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 3, **caracterizado** porque, en el caso de existir desequilibrio másico, se estima la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) necesaria para compensar dicho efecto en un radio ( $r_{EQ}$ ) determinado del rotor (1) a partir de la magnitud (13) de dicho armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) y la velocidad de giro del rotor.

40 5. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 4, **caracterizado** porque dicho método comprende además los siguientes pasos:

- calcular a partir de la fase del armónico 1p la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ) en que habría que situar dicha masa equivalente ( $m_{EQ}$ ), y
- 45 - calcular, a partir de la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) y la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ), las masas ( $m_{EQ1}$ ,  $m_{EQ2}$ ) a colocar en las palas contiguas a dicha posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ).

50 6. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 4, **caracterizado** porque dicho método comprende además los siguientes pasos:

- calcular a partir de la posición azimutal ( $\Psi$ ) que muestra el rotor en reposo la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ) en que habría que situar dicha masa equivalente ( $m_{EQ}$ ), y;
- 55 - calcular, a partir de la masa equivalente ( $m_{EQ}$ ) y la posición angular equivalente ( $\alpha_{EQ}$ ), las masas ( $m_{EQ1}$ ,  $m_{EQ2}$ ) a colocar en las palas contiguas a dicha posición equivalente.

60 7. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque una vez se ha verificado que no hay desequilibrio másico dicho método comprende los siguientes pasos adicionales:

- 65 • hacer funcionar al aerogenerador a un régimen de producción de potencia próximo a su potencia nominal;
- obtener unas señales indicativas de las cargas en el aerogenerador mediante sensores localizados en la nacelle (2) y/o la torre (3), o mediante parámetros operacionales de la turbina;
- calcular en dichas señales indicativas de cargas en el aerogenerador al menos una magnitud (13) del armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ) del rotor,
- comparar la magnitud (13) del armónico 1p con un segundo umbral preestablecido, y;

## ES 2 376 815 A1

- decidir que existe un desequilibrio aerodinámico en el rotor (1) si dicha magnitud supera el citado umbral.

5 8. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 7, **caracterizado** porque, en el caso de existir desequilibrio aerodinámico, se decide a partir de la fase (14) del armónico 1p de las señales indicativas de cargas en el aerogenerador cuál es la pala o palas que originan el desequilibrio.

10 9. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 8, **caracterizado** porque las señales indicativas de las cargas en el aerogenerador proceden de la medida de, al menos, un acelerómetro (10).

15 10. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 9, **caracterizado** porque, en el caso de existir desequilibrio aerodinámico, se estima el ángulo que hay que corregir en una o varias palas para compensar dicho efecto a partir de:

- la magnitud (13) de dicho armónico 1p calculado en función de la posición azimutal ( $\Psi$ ), y;
- la relación precalculada entre dicha magnitud 1p y el ángulo de error en el posicionamiento de una pala.

20 11. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 10, **caracterizado** porque el desequilibrio aerodinámico se compensa corrigiendo el ángulo de calado en al menos una pala de dicho rotor.

25 12. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 11, **caracterizado** porque dicha compensación se hace mediante una corrección puntual del ángulo de calado de una o varias palas aplicado por el programa de control.

30 13. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según la reivindicación 11, **caracterizado** porque dicha compensación se hace mediante un nuevo montaje de una o varias palas en el buje (4).

35 14. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque se utiliza la medida de temperatura ambiente para descartar el hielo como origen del desequilibrio.

40 15. Método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, **caracterizado** por que se aplica en la puesta en marcha de un aerogenerador tras su instalación.

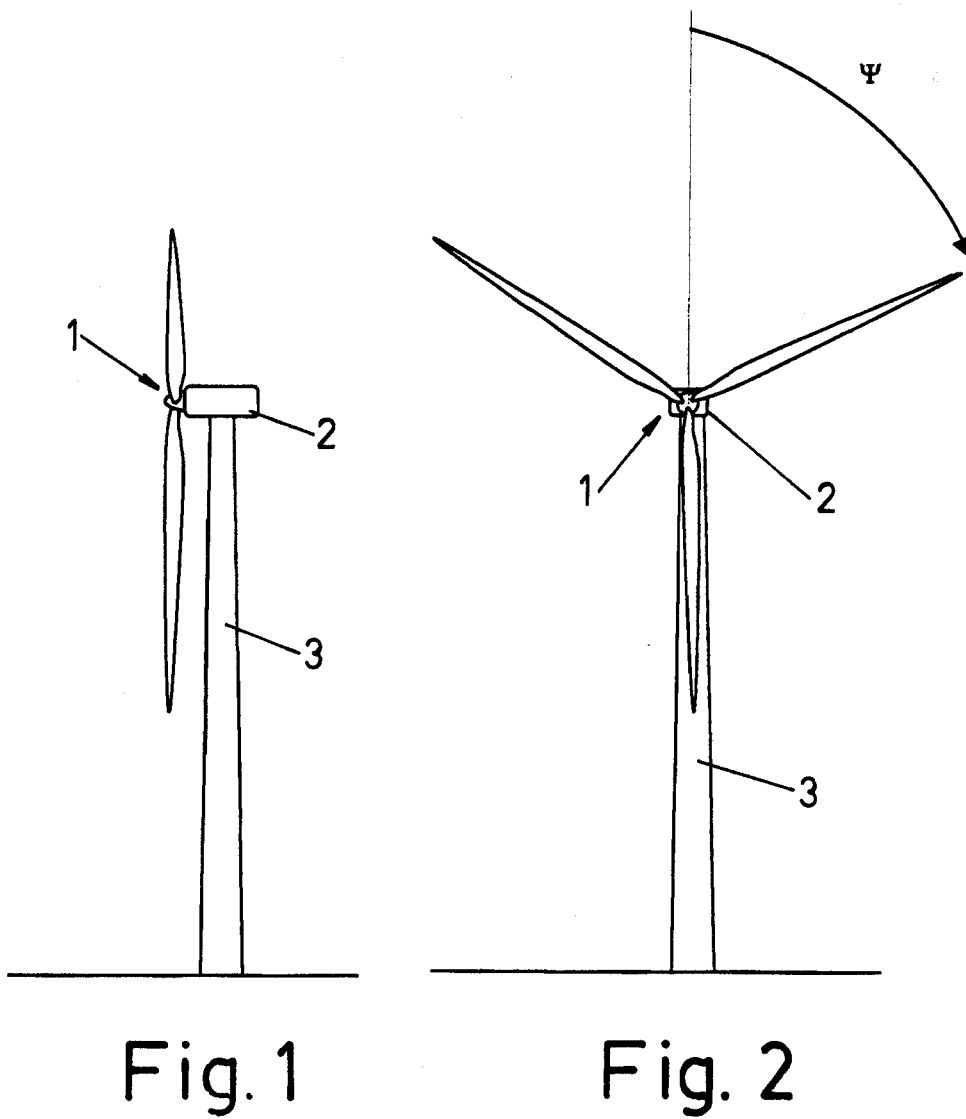
45

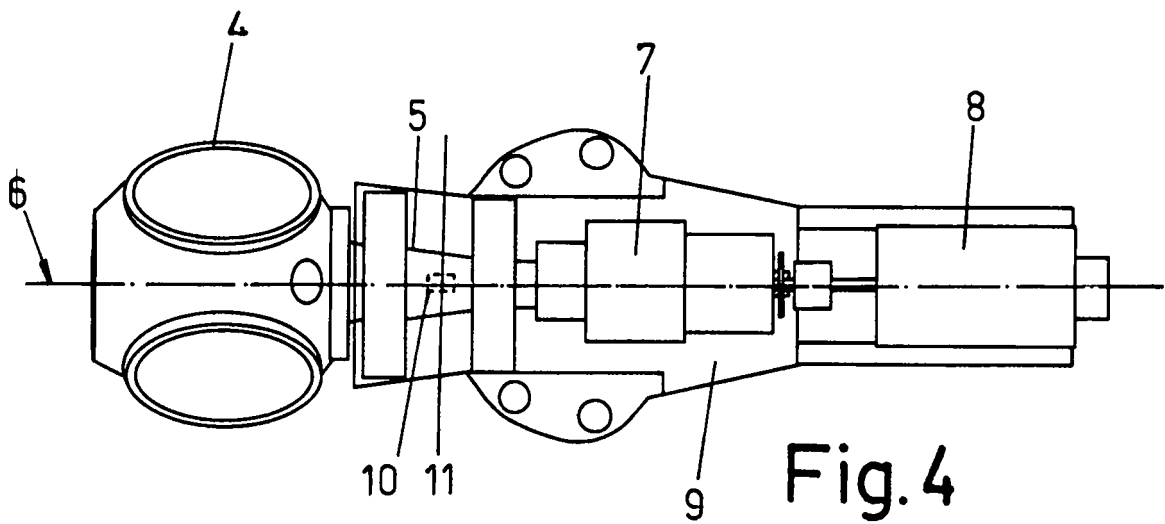
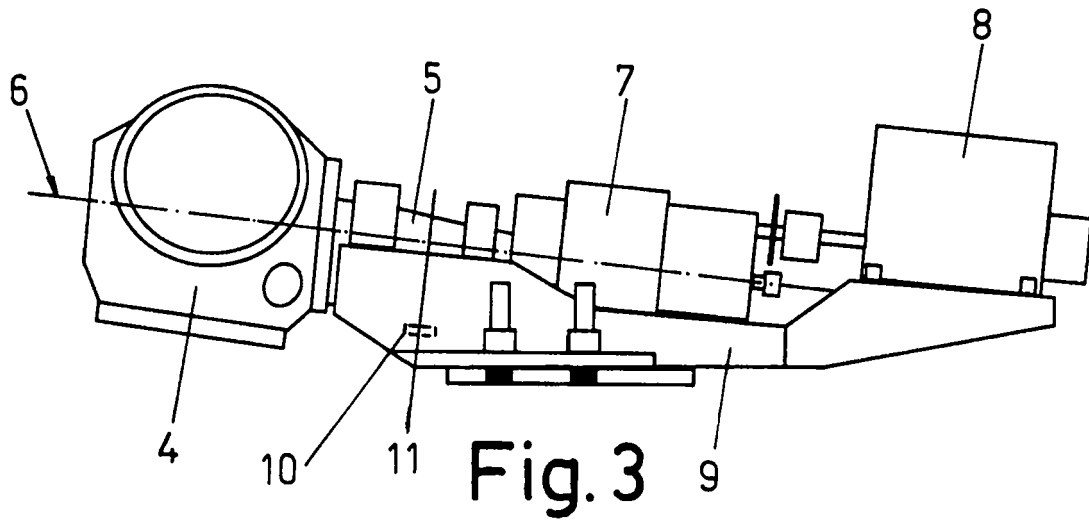
50

55

60

65





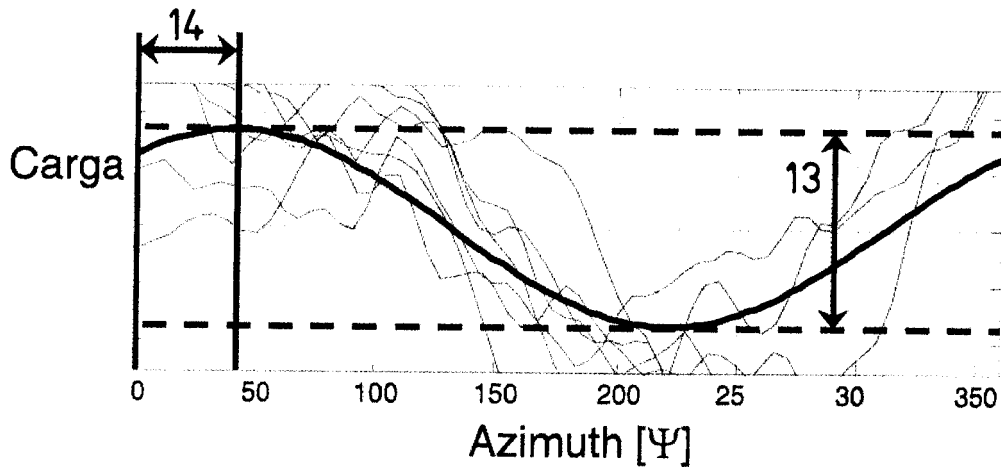


Fig.5

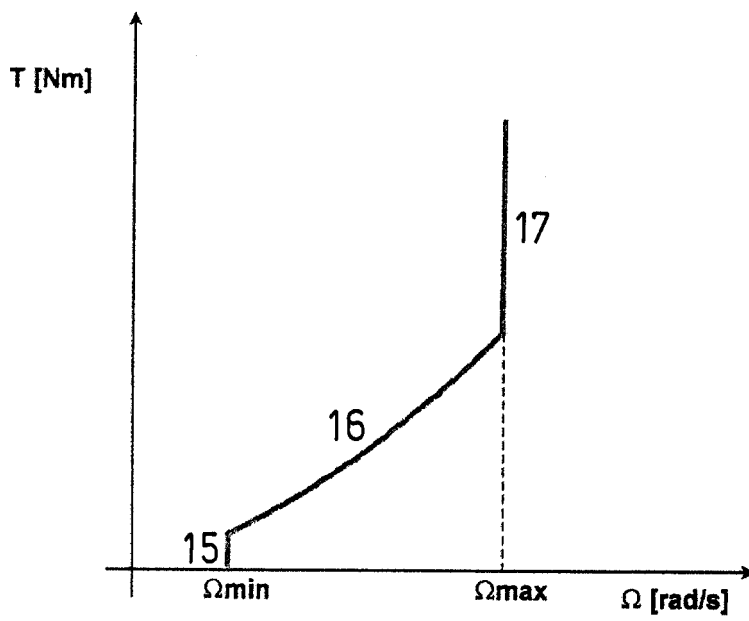


Fig.6

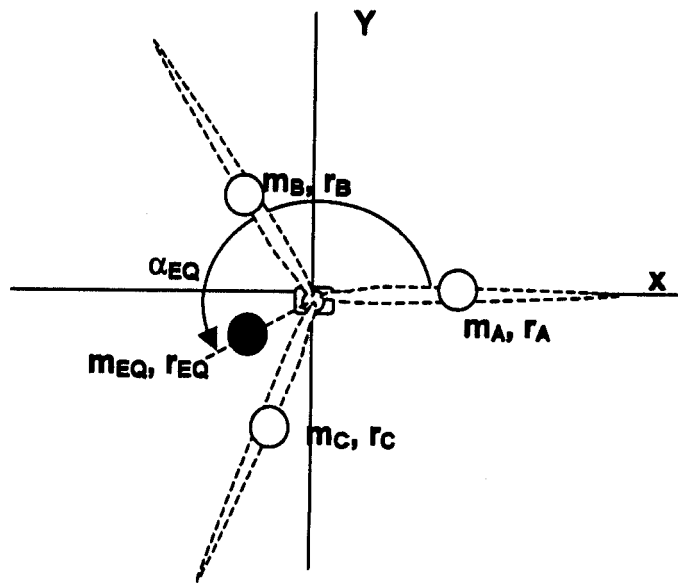


Fig. 7

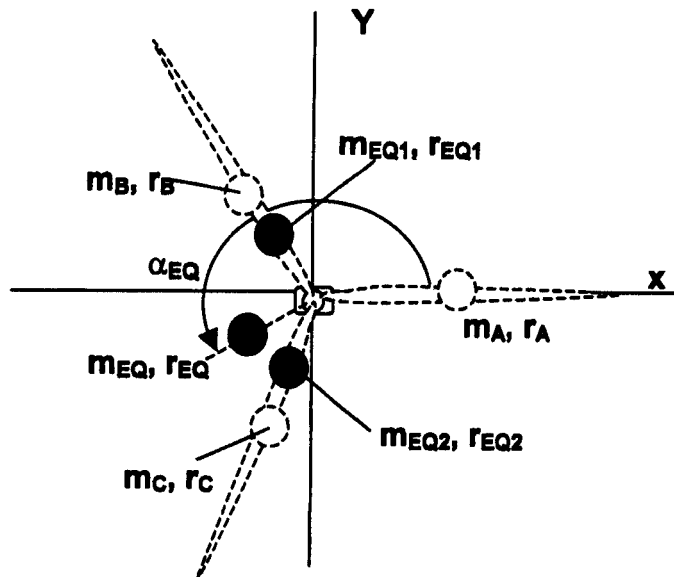


Fig. 8

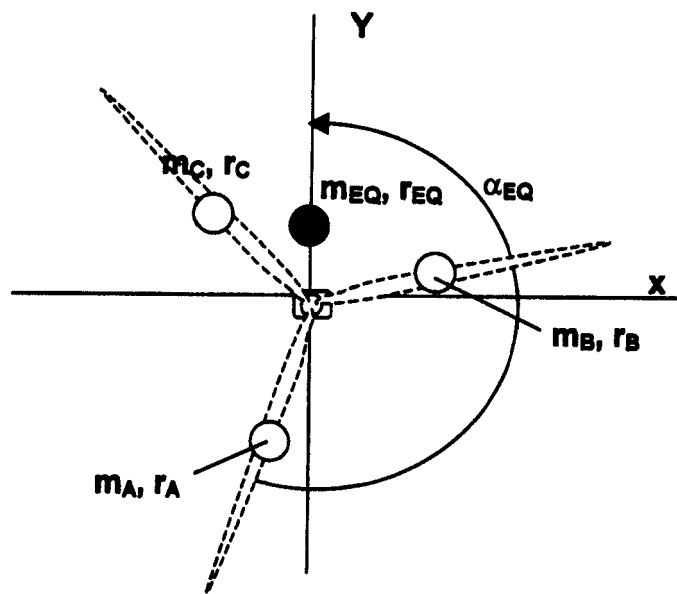


Fig.9



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 200803726

②② Fecha de presentación de la solicitud: 29.12.2008

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	EP 1978246 A1 (SIEMENS AG) 08.10.2008, todo el documento.	1-15
A	US 5219454 A (CLASS DENIS) 15.06.1993, todo el documento.	1-15
A	BORG JP, KIRCHHOFF RH (Department of Mechanical Engineering University of Massachusetts, Amherst MA 01002). "Mass and Aerodynamic Imbalance of a Horizontal Axis Wind Turbine". ASME Febrero 1998. Vol. 120, páginas 66-74 [en línea], [recuperado el 29.02.2012]. Recuperado de internet: <URL: <a href="http://193.146.160.29/gtb/sod/usu/UBUG/repositorio/10280688_BPRG.pdf">http://193.146.160.29/gtb/sod/usu/UBUG/repositorio/10280688_BPRG.pdf</a> >	1-15
A	HILLMANN M, BAUER A, RISCHE T. "Vibration Analysis of Rotor Blades and Balancing of Rotors on Wind Turbines". En: DEWEK 2004-Proceedings. Poster 1: Operation & Monitoring. [en línea], [recuperado el 29.02.2012]. Recuperado de internet: <URL: <a href="http://www.cpmx.com/tl_files/content/know-how/wissenschaftliche%20Arbelten/Mathias_DEWEK_p01_6.pdf">http://www.cpmx.com/tl_files/content/know-how/wissenschaftliche%20Arbelten/Mathias_DEWEK_p01_6.pdf</a> >	1-15

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
29.02.2012

Examinador  
M. P. Prytz González

Página  
1/4

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

**F03D7/02** (2006.01)

**F03D11/00** (2006.01)

**G01M1/16** (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

F03D, G01M

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 29.02.2012

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-15	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-15	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	EP 1978246 A1 (SIEMENS AG)	08.10.2008
D02	US 5219454 A (CLASS DENIS)	15.06.1993
D03	BORG JP, KIRCHHOFF RH (Department of Mechanical Engineering University of Massachusetts, Amherst MA 01002). "Mass and Aerodynamic Imbalance of a Horizontal Axis Wind Turbine". ASME Febrero 1998. Vol. 120, páginas 66-74 [en línea], [recuperado el 29.02.2012]. Recuperado de internet: <URL: <a href="http://193.146.160.29/gtb/sod/usu/UBUG/repositorio/10280688_BPRG.pdf">http://193.146.160.29/gtb/sod/usu/UBUG/repositorio/10280688_BPRG.pdf</a> >	Febrero 1998
D04	HILLMANN M, BAUER A, RISCHE T. "Vibration Analysis of Rotor Blades and Balancing of Rotors on Wind Turbines". En: DEWEK 2004-Proceedings. Poster 1: Operation & Monitoring. [en línea], [recuperado el 29.02.2012]. Recuperado de internet: <URL: <a href="http://www.cpmx.com/tl_files/content/know-how/wissenschaftliche%20Arbeiten/Mathias_DEWEK_p01_6.pdf">http://www.cpmx.com/tl_files/content/know-how/wissenschaftliche%20Arbeiten/Mathias_DEWEK_p01_6.pdf</a> >	2004

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

La presente solicitud de patente hace referencia a un método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador.

Consta la solicitud de 15 reivindicaciones, siendo independiente la primera reivindicación y el resto dependientes, directa o indirectamente, de ella.

La primera reivindicación, independiente, divulga un método para evaluar el desequilibrio del rotor de un aerogenerador que comprende las siguientes etapas:

- Hacer funcionar al aerogenerador a un régimen de producción de potencia substancialmente menor que su potencia nominal.
- Obtener unas señales indicativas de las cargas en el aerogenerador mediante sensores localizados en la nacelle y/o la torre del aerogenerador o mediante parámetros operacionales de la turbina.
- Calcular en dichas señales indicativas de cargas en el aerogenerador al menos una magnitud del armónico 1p calculado en función de la posición acimutal del rotor.
- Comparar la magnitud del armónico 1p con un umbral establecido.
- Decidir que existe un desequilibrio másico en el rotor si dicha magnitud supera el citado umbral.

Los documentos D01 a D04 se consideran una representación del estado de la técnica al que pertenece la invención.

Ninguno de los documentos citados contempla un procedimiento para evaluar el desequilibrio másico de un aerogenerador como el que se detalla en la reivindicación 1.

El documento D01 divulga un método similar al reivindicado en la reivindicación 1 pero no especifica que se realice a un régimen de velocidad menor que el nominal. Tampoco distingue entre desequilibrio másico y aerodinámico.

El documento D02 contempla realizar la medida del desequilibrio del rotor utilizando acelerómetros de tal manera que se hace girar el rotor a baja velocidad angular (descripción, columna 4, líneas 1 a 7). Este método tampoco distingue entre desequilibrio másico y aerodinámico ni analiza la magnitud de los armónicos 1p en función de la posición acimutal del rotor.

El documento D03 no señala diferencias en el régimen de giro para evaluar el desequilibrio másico y el aerodinámico.

El documento D04 contempla un método para evaluar el desequilibrio másico a bajas frecuencias de giro (apartado 5.1, párrafo primero) pero no especifica que se analicen las frecuencias del armónico 1p en función de la posición acimutal del rotor.

Por lo expuesto anteriormente, el método reivindicado en la reivindicación 1 de la solicitud se considera nuevo y que implica actividad inventiva en el sentido de los Artículos 6 y 8 de la Ley 11/1986 de Patentes.

El resto de reivindicaciones 2 a 15 al ser dependientes de la reivindicación 1 también son nuevas e implican actividad inventiva en el sentido de los Artículos 6 y 8 de la Ley 11/1986 de Patentes.