

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 013 626**

51 Int. Cl.:

**F03D 1/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.11.2021** **E 21208272 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.02.2025** **EP 4180653**

54 Título: **Diseño de pala de rotor de aerogenerador**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.04.2025**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.00%)  
Hedeager 42  
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**THESBJERG, LEO;  
SØRENSEN, SØREN HOVE y  
VIOLATO, GUSTAVO OLIVEIRA**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 3 013 626 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**

Diseño de pala de rotor de aerogenerador

**5 Campo de la invención**

La invención se refiere a un método de diseño de una pala de rotor de aerogenerador y, en particular, a la determinación de un factor de seguridad de carga de fatiga reducido y al diseño de la pala de rotor de aerogenerador de acuerdo con una carga de diseño determinada en función del factor de seguridad de carga de fatiga reducido.

10

**Antecedentes**

Las palas de rotor de aerogenerador siguen aumentando de tamaño y, por tanto, de peso, en el empeño por aumentar cada vez más la capacidad de captación de energía eólica de los aerogeneradores. Como tal, también aumentan las cargas que determinados componentes o piezas de los aerogeneradores experimentan y deben soportar como consecuencia del mayor peso de las palas de rotor.

15

Existen diferentes tipos de cargas que los componentes de los aerogeneradores deben soportar a lo largo de su vida útil, p. ej., las cargas últimas previstas que se experimentarán a lo largo de la vida útil del componente, y las cargas de fatiga causadas por la naturaleza cíclica o periódica del funcionamiento del aerogenerador (es decir, el movimiento de rotación del rotor y las palas). La carga sobre las palas de los rotores de los aerogeneradores puede provenir de diversas fuentes, como fuentes aerodinámicas, gravitacionales, centrífugas, giroscópicas y operacionales.

20

La desviación de las palas del rotor de un aerogenerador en distintas direcciones puede deberse a diferentes fuentes de carga. A modo de ejemplo, la desviación de las palas en la dirección de batimiento puede deberse principalmente a la carga aerodinámica, mientras que la desviación de la pala en dirección de borde puede deberse principalmente a la carga de gravedad. Como la carga de gravedad depende de la masa, a continuación, las palas del rotor de mayor masa dan lugar a mayores cargas en el sentido de borde.

25

Se produce un problema si la masa de una pala del rotor es de tal manera que la carga prevista sobre uno o más componentes del aerogenerador causada por la pala del rotor supera la capacidad de carga de los componentes. En un caso, la carga de fatiga prevista en determinados componentes supera su capacidad. Por lo tanto, se desea proporcionar un diseño de pala de rotor de aerogenerador que optimice la capacidad de captación de energía eólica manteniéndose dentro de los límites de capacidad de carga de los componentes del aerogenerador.

30

35

En este contexto se inscribe la presente invención.

Griffin divulga en "Blade System Desing Studies Volume II: Preliminary Blade Designs and Recommended Test Matrix" en Sand Control 2004, páginas 3-38, XP003030879 aspectos que se refieren a materiales y cuestiones de fabricación de grandes palas. Se hace referencia a los aspectos de carga de gravedad.

40

Vera-Tudela y Kuhn divulgan en "Analysing wind turbine fatigue load prediction: The impact of wind farm flow conditions" en Renewable Energy, vol. 107, páginas 352-360, XP029940980 aspectos en relación con las cargas de fatiga relativas a la flexión de las palas.

45

**Sumario de la invención**

Según un aspecto de la presente invención, se proporciona un método de diseño de una pala de rotor de aerogenerador según la reivindicación 1.

50

El método comprende: a) seleccionar un factor de seguridad de carga de gravedad

asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador debida a la gravedad, seleccionándose el factor de seguridad de carga de gravedad para ser menor que un factor de seguridad de carga eólica definido asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador que no es debida a la gravedad; b) determinar una carga de diseño de gravedad corregida para la desviación o flexión de pala de rotor de aerogenerador, determinándose la carga de diseño de gravedad corregida en función del factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado y del factor de seguridad de carga eólica definido; y, c) diseñar una pala de rotor de aerogenerador de gravedad corregida de acuerdo con la carga de diseño de gravedad corregida determinada.

55

60

El método comprende, además, la determinación de una probabilidad de fallo de gravedad corregida de la pala de rotor diseñada para un modo de fallo de fatiga debido a la desviación de pala. Si la probabilidad de fallo de gravedad corregida determinada es mayor que una probabilidad de fallo de referencia para el modo de fallo de fatiga, a continuación, el método puede comprender el aumento del factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado y la repetición de las etapas b) y c). Por otro lado, si la probabilidad de fallo de gravedad corregida determinada es menor que la probabilidad de fallo de referencia para el modo de fallo de fatiga, a continuación, el método puede

65

comprender la disminución del factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado y la repetición de las etapas b) y c).

5 La determinación de la probabilidad de fallo de gravedad corregida puede comprender la especificación de una dirección de desviación de la pala para el modo de fallo de fatiga.

10 El método puede comprender el uso de un modelo de carga total definido para predecir una carga total indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador. El método puede comprender el uso de un modelo de carga de gravedad definido para predecir una carga de gravedad indicativa de la carga de fatiga debida a la gravedad de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador. El método puede comprender la determinación de una señal de carga eólica indicativa de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador. La señal de carga eólica puede determinarse en función de la carga total y la carga de gravedad. La probabilidad de fallo de gravedad corregida puede determinarse en función de una ecuación de estado límite que incluye una incertidumbre asociada a una señal indicativa de la carga de gravedad y una incertidumbre asociada a la señal de carga eólica.

20 La definición del modelo de carga de gravedad puede comprender el ajuste de uno o más parámetros del modelo de carga total definido de la siguiente manera: establecer un parámetro de turbulencia igual a, o sustancialmente igual a, cero; establecer un parámetro de cizalladura del viento igual a, o sustancialmente igual a, cero; aumentar el valor de un parámetro de amortiguación estructural de las oscilaciones en sentido de batimiento y de borde de la pala de rotor diseñada en al menos un orden de magnitud, y preferentemente en al menos dos órdenes de magnitud.

25 El método puede comprender diseñar una pala de rotor de aerogenerador estándar de acuerdo con una carga de diseño estándar que se basa en un factor de seguridad de carga estándar asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador. El método puede comprender determinar la probabilidad de fallo de referencia como una probabilidad de fallo de la pala de rotor estándar para el modo de fallo de fatiga debido a la desviación de la pala en una dirección de batimiento.

30 El método puede comprender utilizar un modelo de carga total definido para predecir una carga total indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador. El método puede comprender utilizar un modelo de carga de gravedad definido para predecir una carga de gravedad indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador. El método puede comprender determinar una señal de carga eólica indicativa de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador en función de las cargas total y de gravedad de la pala de rotor estándar. La probabilidad de fallo de referencia puede determinarse en función de una ecuación de estado límite que incluye una incertidumbre asociada a la señal de carga eólica para la pala de rotor estándar.

40 El factor de seguridad de carga eólica puede definirse como igual al factor de seguridad de carga estándar. Opcionalmente, el factor de seguridad de carga estándar se obtiene de una norma industrial. Además, opcionalmente, el factor de seguridad de carga estándar es igual a uno.

45 La carga de diseño de gravedad corregida se puede determinar en función del factor de seguridad de carga de gravedad aplicado a una señal indicativa de la carga de gravedad para la pala de rotor estándar y del factor de seguridad de carga eólica aplicado a la señal de carga eólica para la pala de rotor estándar.

50 La señal de carga eólica puede ser una desviación típica de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador. La señal de carga eólica puede determinarse en función de una desviación típica determinada de la carga de gravedad. La carga de diseño de gravedad corregida puede determinarse en función del factor de seguridad de carga de gravedad aplicado a la desviación típica de la carga de gravedad para la pala de rotor estándar y del factor de seguridad de carga eólica aplicado a la desviación típica de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar.

55 La desviación típica  $\sigma_{ag}$  de la carga de gravedad puede obtenerse según

$$L_{\alpha g}^m N_{ref} = (2\sqrt{2}\sigma_{\alpha g})^m f_g T_L$$

60 donde  $m$  es la pendiente considerada de una curva SN,  $T_L$  es la vida útil de diseño de la pala de rotor,  $L_{\alpha g}$  es la carga de gravedad para un número de referencia de ciclos de carga  $N_{ref}$ , y  $f_g$  es una frecuencia de una señal de carga sinusoidal correspondiente a una frecuencia de la carga de gravedad.

La desviación típica  $\sigma_{aw}$  de la carga de fatiga no debida a la gravedad puede obtenerse según

$$L_{\alpha}^m N_{ref} = (2\sqrt{2}\sigma_{\alpha g})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) M\left(-\frac{m}{2}, 1, -\left(\frac{\sigma_{\alpha g}}{\sigma_{\alpha w}}\right)^2\right) v T_L$$

donde  $L_{\alpha}$  es la carga total para el número de referencia de ciclos de carga  $N_{ref}$ ,  $M(\cdot; \cdot; \cdot)$  es una función hipergeométrica confluyente, y  $v$  es una frecuencia promedio de ciclos de carga.

5 El factor de seguridad de carga de gravedad puede seleccionarse de modo que sea igual, o aproximadamente igual a, 0,9. Opcionalmente, el factor de seguridad de carga de gravedad se aumenta en un incremento de aproximadamente 0,01 antes de repetir las etapas b) y c).

10 Una o más etapas del método definido pueden implementarse por ordenador. La selección del factor de seguridad de carga de gravedad puede comprender que la selección sea recibida por un ordenador que ejecute una o más etapas posteriores del método.

15 El método puede comprender la fabricación de la pala de rotor de aerogenerador de gravedad corregida diseñada de acuerdo con la carga de diseño de gravedad corregida determinada.

Según un ejemplo, se proporciona un medio de almacenamiento no transitorio, legible por ordenador, que almacena instrucciones que, cuando se implementan en uno o más procesadores de ordenador, hacen que uno o más procesadores de ordenador realicen el método definido anteriormente.

20 Según un ejemplo, se proporciona un dispositivo informático para diseñar una pala de rotor de aerogenerador. El dispositivo informático está configurado para recibir un factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador debida a la gravedad, seleccionándose el factor de seguridad de carga de gravedad para ser menor que un factor de seguridad de carga eólica definido asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador que no es debida a la gravedad. El dispositivo informático está configurado para determinar una carga de diseño de gravedad corregida para la desviación de pala de rotor de aerogenerador, determinándose la carga de diseño de gravedad corregida en función del factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado y del factor de seguridad de carga eólica definido. El dispositivo informático está configurado para diseñar una pala de rotor de aerogenerador de gravedad corregida de acuerdo con la carga de diseño de gravedad corregida determinada. El dispositivo informático puede ser, o incluir, un procesador informático configurado para ejecutar las etapas definidas del método.

35 Según un ejemplo, se proporciona una pala de rotor de aerogenerador diseñada según el método definido anteriormente.

Según un ejemplo, se proporciona un método para diseñar un componente estructural de un aerogenerador. El método comprende la selección de un factor de seguridad de carga de gravedad asociado a la carga de fatiga debida a la gravedad de los componentes estructurales del aerogenerador, seleccionándose el factor de seguridad de carga de gravedad para ser menor que un factor de seguridad de carga eólica definido asociado a la carga de fatiga de componente estructural de aerogenerador que no es debida a la gravedad. El método comprende la determinación de una carga de diseño de gravedad corregida para la desviación de los componentes estructurales del aerogenerador, determinándose la carga de diseño de gravedad corregida en función del factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado y del factor de seguridad de carga eólica definido. El método comprende el diseño de un componente estructural del aerogenerador de gravedad corregida de acuerdo con la carga de diseño de gravedad corregida determinada.

### Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describirán ejemplos de la invención con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

50 la figura 1 ilustra esquemáticamente una pala de rotor de aerogenerador diseñada de acuerdo con un ejemplo de la invención;

55 la figura 2 ilustra las etapas de un método de diseño de pala de rotor del aerogenerador de la figura 1 de acuerdo con un ejemplo de la invención;

la figura 3 ilustra otras etapas del método de la figura 2 de acuerdo con un ejemplo de la invención; y,

60 la figura 4 ilustra otras etapas del método de la figura 2 de acuerdo con un ejemplo de la invención.

### Descripción detallada de las realizaciones

La invención se refiere al diseño de una pala de rotor de aerogenerador, tal como la pala de rotor 10 ilustrada esquemáticamente en la figura 1. Como se muestra, la pala 10 incluye un extremo de raíz 101 en que la pala se monta

en el buje del rotor de un aerogenerador, y un extremo de punta 102 opuesto al extremo de raíz 101. La pala 10 tiene generalmente forma aerodinámica y presenta un borde de ataque 104 y un borde de salida 103. La pala 10 define las direcciones de borde 105 y de batimiento 106. Durante el funcionamiento de un aerogenerador, la pala de rotor 10 puede experimentar vibraciones en los sentidos de borde y de batimiento.

5 El diseño de la pala de rotor 10 influye en la eficiencia de la captación de energía durante el funcionamiento del aerogenerador. Sin embargo, el diseño de la pala de rotor 10 también influye en la carga experimentada por diversos componentes del aerogenerador 10 durante su funcionamiento. Por lo tanto, la pala de rotor 10 debe diseñarse para maximizar la captación de energía al tiempo que se minimiza la carga de los componentes. En particular, la pala de rotor 10 está diseñada de acuerdo con las normas pertinentes que rigen el diseño estructural. Específicamente, es necesario verificar la integridad de los componentes que soportan la carga de la estructura del aerogenerador y determinar un nivel de seguridad aceptable para un diseño en particular de la pala de rotor 10. La resistencia última y a la fatiga de los miembros estructurales debe verificarse mediante cálculos y/o ensayos para demostrar la integridad estructural del aerogenerador con el nivel de seguridad adecuado para un diseño determinado de la pala de rotor 10.

15 Para un diseño en particular de la pala de rotor 10, es necesario verificar que no se superan los estados límite de la estructura del aerogenerador. El estado límite es el estado de una estructura y de las cargas que actúan sobre ella, a partir del cual la estructura deja de cumplir el requisito de diseño. De hecho, el objetivo de los cálculos de diseño, es decir, el requisito de diseño para el estado límite, es mantener la probabilidad de que se alcance un estado límite por debajo de un determinado valor prescrito para la estructura del aerogenerador.

20 Como parte del proceso de verificación del estado límite, se pueden considerar diferentes tipos de cargas experimentadas por el aerogenerador durante su funcionamiento. A modo de ejemplo, las cargas gravitatorias e inerciales son cargas que resultan de la gravedad, la vibración y la rotación. Las cargas aerodinámicas son cargas estáticas y dinámicas causadas por el flujo de aire y su interacción con las partes fijas y móviles del aerogenerador. El flujo de aire puede depender de la velocidad del viento y de las turbulencias en el plano del rotor, la velocidad de rotación del rotor del aerogenerador, la densidad del aire y las formas aerodinámicas de los componentes del aerogenerador y sus efectos interactivos. Otras cargas tales como las asociadas al accionamiento y el control de los componentes del aerogenerador, las cargas de estela, las cargas de impacto, las cargas de hielo, etc. también pueden tenerse en cuenta.

25 Durante el diseño de la pala de rotor 10 pueden considerarse varios casos de carga de diseño. En particular, la vida útil de un aerogenerador puede representarse mediante un conjunto de situaciones de diseño que abarcan las condiciones que puede experimentar el aerogenerador. Los casos de carga de diseño se utilizan para verificar la integridad estructural del aerogenerador. El análisis de las cargas de diseño puede incluir el análisis de las cargas últimas o extremas y de las cargas de fatiga. Los diferentes tipos de cargas mencionados anteriormente pueden tenerse en cuenta para el análisis de cada caso de carga de diseño. El análisis puede realizarse con el uso de un modelo de dinámica aeroelástica para predecir las cargas de diseño.

30 Los factores de seguridad parciales se utilizan como parte del análisis de los estados límite de las estructuras de los aerogeneradores. Los coeficientes de seguridad parciales tienen en cuenta las incertidumbres y la variabilidad de las cargas y resistencias, las incertidumbres de los métodos de análisis concretos que se utilizan, y la importancia de los componentes estructurales particulares del aerogenerador con respecto a las consecuencias de un fallo. En particular, la incertidumbre y la variabilidad de las cargas se tienen en cuenta mediante el siguiente factor de seguridad:

$$45 \quad F_d = \gamma_f F_k$$

50 donde  $F_d$  es el valor/carga de diseño para la carga interna agregada o la respuesta de carga a múltiples componentes de carga simultáneos de varias fuentes para un caso de carga de diseño dado,  $\gamma_f$  es el factor de seguridad parcial de las cargas, y  $F_k$  es un valor característico de la carga, normalmente un valor de la carga que tiene una probabilidad prescrita de no alcanzarse (es decir, una probabilidad de rebasamiento inferior que o igual a la cantidad prescrita).

55 Normalmente, para calcular las cargas de los aerogeneradores se utilizan simulaciones dinámicas basadas en un modelo de dinámica estructural. El período total de datos de carga debe ser suficientemente largo para garantizar la fiabilidad estadística de la estimación del valor de carga característico.

60 Como se ha mencionado anteriormente, tanto la carga de rotura como la de fatiga pueden considerarse parte del análisis estructural. Para la carga de rotura, el valor característico de la carga puede determinarse mediante un análisis estadístico/probabilístico de la carga de rotura que se produce en situaciones normales de diseño. Esto podría corresponder a, por ejemplo: el valor extremo entre los valores promedio de los extremos durante un período de tiempo determinado (p. ej., diez minutos) para cada velocidad del viento en un intervalo dado y multiplicado por una constante; el valor extremo entre los valores del percentil 1-ésimo o 99-ésimo a lo largo de un período de tiempo determinado para cada velocidad del viento en un intervalo dado y multiplicado por una constante; o, el valor correspondiente a un período de retorno de 50 años, en función de métodos de extrapolación de cargas. La carga de diseño se obtiene multiplicando las cargas características por el factor de seguridad parcial para un caso particular de carga de diseño.

Para cargas de fatiga, el daño por fatiga puede estimarse utilizando un cálculo adecuado del daño por fatiga. A modo de ejemplo, el estado límite puede alcanzarse cuando el daño acumulado supera un valor especificado, p. ej., uno. Por lo tanto, el daño acumulado a lo largo de la vida útil del aerogenerador debe ser inferior al valor especificado.

- 5 Normalmente, los cálculos de los daños por fatiga tendrán en cuenta los efectos del intervalo cíclico y los niveles medios de deformación/esfuerzo. Pueden aplicarse parcialmente factores de seguridad al intervalo de deformación cíclica para evaluar el incremento de daño asociado a cada ciclo de fatiga. El factor de seguridad parcial para cargas de fatiga suele ser un valor definido y constante, p. ej., uno.
- 10 En el empeño por aumentar la capacidad de captación de energía de los aerogeneradores, el tamaño (y la masa) de las palas del rotor sigue aumentando. Se plantea un problema cuando las cargas experimentadas por los componentes estructurales del aerogenerador superan su capacidad. En un ejemplo, las cargas de fatiga de los insertos de raíz de pala de un aerogenerador superan sus límites como consecuencia del mayor peso de las palas del rotor.
- 15 Los inventores de la presente invención han confirmado que, para el diseño de la pala de rotor de un aerogenerador, puede utilizarse un factor de seguridad más bajo para la parte de la carga de fatiga de una pala de rotor de aerogenerador que surge como resultado de fuerzas gravitatorias en relación con un factor de seguridad para la parte de la carga de fatiga que no surge de la gravedad, manteniéndose dentro de unos límites aceptables de probabilidad de fallo de fatiga. Esto se debe a que la incertidumbre asociada a la carga de fatiga de las palas debida a la gravedad es menor que la incertidumbre asociada a la carga de fatiga de las palas debida a los efectos del viento. En otras palabras, la carga de fatiga debida al viento es menos previsible que la carga de fatiga debida a la gravedad. Beneficiosamente, el uso de factores de seguridad independientes para la carga de fatiga permite optimizar el uso de materiales en el diseño de las palas del rotor sin comprometer la seguridad estructural.
- 20
- 25 Para la carga de rotura puede utilizarse un enfoque similar. Sin embargo, si bien es cierto que la carga de rotura de una pala de rotor puede dividirse fácilmente en una parte debida a la gravedad y otra debida a efectos distintos de la gravedad (p. ej., predominantemente el viento), dicha división no es tan fácilmente posible para la carga de fatiga. En particular, para la carga de fatiga es necesario considerar toda la serie temporal que modela las cargas a lo largo del tiempo. Por tanto, el planteamiento de la carga de fatiga debe formularse como un problema de probabilidad. También se plantea la cuestión de qué valor debe tomar el factor de seguridad inferior para la carga de fatiga debida a la gravedad. Estos puntos se tratarán con más detalle a continuación.
- 30

Un punto importante al considerar la carga de las palas del rotor es que diferentes fuerzas pueden ser predominantemente responsables de la carga en diferentes direcciones. En particular, la carga de las palas en la dirección de batimiento puede deberse principalmente a las variaciones de las condiciones del viento en las proximidades del aerogenerador, p. ej., debido al viento que "empuja" hacia la torre (puede haber aproximadamente una contribución nula de la gravedad en esta dirección). Por otro lado, la carga de las palas en la dirección de borde puede deberse principalmente a la gravedad (p. ej., el 80-90 % de la carga transversal puede deberse a la gravedad). Como hay una mayor variación en las fuerzas del viento en comparación con las fuerzas gravitatorias que experimentan las palas del rotor (es decir, hay más control sobre las fuerzas gravitatorias que se experimentan), a continuación, hay un mayor grado de incertidumbre asociada con la carga en el sentido de batimiento que la carga en sentido de borde. Por lo tanto, un menor factor de seguridad para la gravedad significa una menor carga de diseño en la dirección de borde, lo que significa que la pala del rotor puede diseñarse ventajosamente utilizando menos material.

- 35
- 40
- 45 A continuación, se describe cómo, al diseñar una pala de rotor, puede aplicarse un factor de carga reducido para la denominada "parte de gravedad" de una carga de fatiga en relación con el factor de carga aplicado para la denominada "parte de viento" de la carga de fatiga (es decir, la carga no debida a la gravedad), mientras que la probabilidad de fallo en la dirección de borde (donde domina la gravedad) de la pala es inferior (o al menos similar) a la probabilidad de fallo en la dirección de batimiento (donde domina la variación del viento). La probabilidad de fallo puede determinarse utilizando métodos conocidos en el estado de la técnica.
- 50

Cuando se vaya a utilizar un factor de carga independiente para la parte gravitatoria de la carga de fatiga en sentido de borde, a continuación, la carga total sobre la pala debe dividirse en una parte de gravedad y la parte de viento de la carga de fatiga. La carga total puede obtenerse a partir de simulaciones estándar o normales para predecir las cargas de un modelo de la pala del rotor diseñada. Dichas simulaciones pueden realizarse utilizando cualquier paquete de software adecuado, p. ej., Vestas Turbine Simulator (VTS).

- 55
- 60 Las cargas que deben usarse para determinar un factor de carga reducido para la parte de gravedad ("factor de carga de gravedad corregida" o "factor de seguridad de carga de gravedad") son las cargas de fatiga equivalentes resultantes para una pendiente considerada de una curva  $S/N$ ,  $m$  (es decir, una curva de la carga aplicada  $S$  frente al número de ciclos hasta el fallo  $N$ ), obtenido a partir de un espectro de carga completo utilizado para un análisis de fatiga que cubra la vida útil de diseño, denominado  $T_L$ . Las cargas de fatiga equivalentes denominadas  $L$  se encuentran para un número de ciclos de referencia,  $N_{ref}$ . Las cargas equivalentes son cargas cíclicas con una amplitud/intervalo constante.

- 65 La parte/carga de gravedad puede obtenerse a partir de un conjunto separado de simulaciones en las que las excitaciones procedentes del viento se eliminan en la medida de lo posible, de tal manera que la carga simulada

represente (al menos predominantemente) la gravedad. En particular, la carga de gravedad puede obtenerse a partir de simulaciones que difieren de un análisis de fatiga estándar en que puede utilizarse una elevada amortiguación de las palas para suprimir los efectos dinámicos de la carga eólica, y que no incluye turbulencia ni cizalladura del viento.

5 Sin embargo, la carga eólica no puede obtenerse desde otra serie de simulaciones. También, ya que la carga de fatiga es una medida de los intervalos/ciclos de carga en una serie temporal, a continuación, la contribución de la parte/carga de viento no puede obtenerse simplemente como la diferencia entre la carga total y la carga de gravedad. Esto se debe a que dependerá en gran medida de la correlación entre ambas y de las frecuencias dominantes en las dos señales.

10 El enfoque descrito para separar la carga total  $L_\alpha$  para una dirección dada  $a$  en una parte de gravedad  $L_{ag}$  y una parte de viento  $L_{aw}$  es determinar la desviación típica subyacente para cada una de las dos señales, denominadas  $\sigma_{ag}$  y  $\sigma_{aw}$ , respectivamente. Para tal fin, se utilizan dos ecuaciones para las cargas equivalentes que representan la carga de gravedad y la carga total, escritas en términos de las desviaciones típicas.

15 Puede suponerse que la carga de gravedad puede representarse mediante una señal sinusoidal. A continuación, la relación entre la carga equivalente y la desviación típica puede expresarse de la siguiente manera

$$L_{ag}^m N_{ref} = (2\sqrt{2}\sigma_{ag})^m f_g T_L$$

20 donde  $f_g$  es la frecuencia de la señal de carga sinusoidal correspondiente a 1P (es decir, la frecuencia para la carga de gravedad).

25 Una ecuación para la carga total supone que la carga eólica puede representarse mediante un proceso gaussiano de banda estrecha, lo que significa que los medios de carga tendrán una distribución de Rayleigh. Bajo estos supuestos, la carga total puede expresarse en términos de las desviaciones típicas subyacentes según

$$L_\alpha^m N_{ref} = (2\sqrt{2}\sigma_{ag})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) M\left(-\frac{m}{2}, 1, -\left(\frac{\sigma_{ag}}{\sigma_{aw}}\right)^2\right) v T_L$$

30 donde  $M(-, -, -)$  es una función hipergeométrica confluyente, y  $v$  es una frecuencia promedio de ciclos de carga.

Para estimar esta frecuencia, se define la siguiente función para el momento de enésimo orden del espectro de energía para la carga total:

$$35 \lambda(n) = \sigma_{ag}^2 f_g^n + \sigma_{aw}^2 f_w^n$$

donde  $f_w$  es la frecuencia dominante de la carga eólica. La frecuencia  $v$  se toma como la frecuencia de cruce por cero estimada según

$$40 v = \sqrt{\frac{\lambda(2)}{\lambda(0)}}$$

Dadas las cargas equivalentes para la carga total  $L_\alpha$  y la carga de gravedad  $L_{ag}$  de las simulaciones, la desviación típica de la carga de gravedad  $\sigma_{ag}$  se halla a partir de la relación anterior que relaciona la carga equivalente  $L_{ag}$  y la desviación típica  $\sigma_{ag}$ . A continuación, la desviación típica de la carga eólica  $\sigma_{aw}$  puede hallarse utilizando la ecuación que incluye la función hipergeométrica confluyente anterior, donde la frecuencia  $v$  se obtiene utilizando las expresiones para  $\lambda(n)$  y  $v$  anteriores. Se observa que la ecuación para  $\sigma_{aw}$  no es lineal, y necesita ser encontrada mediante un enfoque iterativo.

50 Hay que decir que la carga eólica equivalente  $L_{aw}$  es aún desconocida, y puede que no se pueda estimar realmente. En lugar de utilizar las cargas equivalentes para la gravedad y el viento para calcular el factor de seguridad de carga de gravedad corregida, se utilizarán las respectivas desviaciones típicas calculadas. Se supone que cada carga de fatiga equivalente es proporcional a su desviación típica respectiva, de tal manera que este enfoque dé como resultado el mismo valor que si se utilizaran las cargas.

55 Como se ha mencionado anteriormente,  $\gamma_f$  es el coeficiente de seguridad parcial de las cargas. Así pues,  $\gamma_f$  se toma como el factor de carga estándar para la fatiga (que según las normas de la industria puede ser igual a uno), y  $\gamma_g$  se toma como el factor de carga para la gravedad. La carga de diseño  $L_{ad}$  puede encontrarse a continuación utilizando la

ecuación anterior para  $L_{\alpha}^m N_{ref}$ , donde las desviaciones típicas se multiplican por los factores de carga asociados, es decir, según

$$L_{\alpha}^m N_{ref} = (2\sqrt{2}\gamma_g \sigma_{\alpha g})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) M\left(-\frac{m}{2}, 1, -\left(\frac{\gamma_g \sigma_{\alpha g}}{\gamma_f \sigma_{\alpha w}}\right)^2\right) v T_L$$

5 El factor de carga de gravedad corregida  $\gamma_{L\alpha}$  puede hallarse a continuación como la relación entre la carga de diseño y la carga característica

$$\gamma_{L\alpha} = \frac{L_{\alpha d}}{L_{\alpha}}$$

10 En lo sucesivo, se describe un ejemplo en el que se utiliza el método descrito anteriormente. La frecuencia de gravedad  $f_g$  (1P) y la frecuencia dominante para el viento  $f_w$  dependerán de la velocidad del viento. Esta última parte también depende del ángulo de la carga considerada. En el ejemplo descrito, la frecuencia de gravedad se elige como la nominal 1P (0,17 Hz). La carga eólica tiene contribuciones de 1P, la frecuencia en sentido de batimiento (0,55 Hz) y la frecuencia en sentido de borde (0,85 Hz). A continuación, se elige un valor promedio de 0,4 Hz.

15 En función de las frecuencias elegidas, el factor de carga de gravedad corregida se calcula utilizando las ecuaciones indicadas anteriormente para diferentes relaciones entre la carga equivalente por gravedad y la carga total, denominado  $\eta$ .

$$\eta = \frac{L_{\alpha g}}{L_{\alpha}}$$

La Tabla 1 ilustra los resultados de este ejemplo en particular.

$\eta$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\gamma_{L\alpha}$	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91

25 Tabla 1

El factor de seguridad que para la carga de gravedad se establece en base al requisito de que la probabilidad de fallo asociada debe ser igual (o menor que) en la dirección de batimiento. En un ejemplo, se considera la probabilidad de fallo de un inserto en una raíz de la pala del rotor. En un ejemplo de este tipo, se puede determinar que se puede usar un factor de carga de 0,9 para la parte de gravedad (cuando se usa un factor de carga de 1 para la parte de viento) mediante la verificación de la resistencia de la raíz de la pala.

Una comprobación de la resistencia de la pala del rotor diseñada para el ejemplo considerado se realiza desde una curva SN con una pendiente  $m = 10$  y para usar el enfoque Palmgren-Miner (como es conocido en la técnica). La ecuación del estado límite aplicada viene dada por

$$g(t) = \Delta - \frac{N_{ref} \cdot t}{K \cdot T_L} \cdot X_{SCF}^m \cdot \left(\frac{X_{\alpha} L_{\alpha} X_G S_G}{A}\right)^m$$

40 donde:  $\Delta$  es la incertidumbre del modelo de fatiga y la suma de Palmgren-Miner;  $N_{ref}$  es el número de ciclos de carga de fatiga para la carga equivalente;  $t$  es tiempo;  $T_L$  es la vida útil de diseño utilizada para la carga equivalente;  $m$  es la pendiente de la curva SN lineal;  $K$  es el parámetro material de la curva SN lineal;  $X_{SCF}$  es la incertidumbre de la geometría y la incertidumbre del modelo de los efectos locales de tensión/deformación;  $X_{\alpha}$  es el parámetro de incertidumbre combinado para la carga total en la dirección  $\alpha$ ;  $X_G$  es el parámetro de incertidumbre para un factor de corrección de Goodman debido a la incertidumbre de la carga media;  $S_G$  es el factor de corrección de Goodman (como es conocido en el estado de la técnica, y como se define a continuación); y,  $A$  es un parámetro seccional que define una relación entre la carga y la tensión/deformación nominal.

El término que describe la incertidumbre de la carga en la ecuación del estado límite  $X_{\alpha} L_{\alpha}$  se determina desde la ecuación que incluye la hipergeométrica confluyente anterior introduciendo un parámetro de incertidumbre  $X_w$  referido a la contribución del viento y el parámetro  $X_g$  para la gravedad para obtener

$$(X_{\alpha}L_{\alpha})^m N_{ref} = (2\sqrt{2}X_W\sigma_{\alpha w})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) M\left(-\frac{m}{2}, 1, -\left(\frac{X_g\sigma_{\alpha g}}{X_W\sigma_{\alpha w}}\right)^2\right) vT_L$$

La señal de carga viene dada por una función  $l(t)$  y el valor medio  $\mu_{l\alpha}$ . El factor de corrección de Goodman viene dado por

5

$$S_G = \frac{l_{ust}}{l_{ust} - \mu_{l\alpha}}$$

donde  $l_{ust}$  es la resistencia con respecto a la carga de rotura. También se considera la incertidumbre con respecto a la carga media, y se representa mediante el parámetro  $X_{\mu}$ . El término que cubre la incertidumbre con respecto al factor de Goodman en la ecuación del estado límite  $X_G S_G$  viene dado, a continuación, por

10

$$X_G S_G = \frac{l_{ust}}{l_{ust} - X_{\mu} \mu_{l\alpha}}$$

La ecuación de diseño es similar a la ecuación del estado límite y puede hallarse sustituyendo los parámetros de incertidumbre por factores de seguridad. El factor de seguridad para la carga viene dado por el factor de carga de gravedad corregida  $\gamma_{L\alpha}$  (definido anteriormente), y los diferentes factores de seguridad utilizados para la comprobación de la resistencia se representan mediante el factor de seguridad  $\gamma_R$ . La ecuación de diseño adopta a continuación la forma

15

$$G(A) = 1 - \frac{N_{ref}}{K_c} \cdot (\gamma_{L\alpha} \gamma_R)^m \cdot \left(\frac{L_{\alpha} S_G}{A}\right)^m$$

20

donde  $K_c$  y  $S_G$  son valores característicos del parámetro material en la curva SN y el factor de corrección de Goodman, respectivamente. Los distintos valores de incertidumbre y de factor de seguridad de lo anterior pueden elegirse según convenga.

25

La figura 2 resume las etapas de un método 20 de diseño de una pala de rotor de aerogenerador 10 de acuerdo con la invención, en particular, para usar ventajosamente un factor de seguridad más bajo para la parte de gravedad de la carga de fatiga de la pala. En la etapa 201, el método 20 consiste en seleccionar un factor de seguridad denominado de carga de gravedad asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador debida a la gravedad. En particular, el factor de seguridad de carga de gravedad se selecciona para ser menor que un factor de seguridad de carga eólica definido asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador que no es debida a la gravedad. Es decir, el factor de seguridad asociado a la parte de la carga causada por la gravedad debe ser menor que el factor de seguridad asociado a la parte de la carga no causada por la gravedad, denominado "parte de viento" o "carga eólica", ya que puede considerarse que la carga se debe principalmente a las condiciones del viento. El factor de seguridad de carga eólica puede definirse como igual al factor de seguridad de la carga estándar para la carga de fatiga. A modo de ejemplo, puede obtenerse de una norma industrial o de otras publicaciones. En un ejemplo, este factor de seguridad de carga estándar es igual a uno.

30

35

En la etapa 202, el método 20 consiste en determinar la denominada "carga de diseño de gravedad corregida" para la desviación o flexión de las palas del rotor de un aerogenerador en una dirección arbitraria. La carga de diseño de gravedad corregida se determina en función del factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado y del factor de seguridad de carga eólica definido. En particular, la carga de diseño de gravedad corregida puede determinarse aplicando los factores de seguridad respectivos a las partes de las cargas de las palas correspondientes a la gravedad y al viento (no gravedad). Estas cargas de las palas pueden obtenerse mediante simulación, por ejemplo, como se ha esbozado anteriormente. En la etapa 203, el método 40 consiste en diseñar una denominada "pala de rotor de aerogenerador de gravedad corregida" de acuerdo con la carga de diseño de gravedad corregida determinada.

40

45

Como se ha mencionado anteriormente, es necesario determinar a qué valor debe fijarse el factor de seguridad de carga de gravedad. Una probabilidad de fallo asociada con el factor de seguridad de carga de gravedad reducido puede ser ventajosamente de una magnitud similar, o menor que, una probabilidad de fallo de referencia que puede ser indicativa de una probabilidad de fallo cuando se utiliza un factor de carga estándar para la carga de fatiga. Esto puede requerir un enfoque iterativo para obtener un valor óptimo para el factor de seguridad de carga de gravedad. A modo de ejemplo, puede determinarse una probabilidad de fallo de gravedad corregida de la pala de rotor diseñada para un modo de fallo de fatiga debido a la deformación de la pala. Si la probabilidad de fallo de gravedad corregida determinada es superior a la probabilidad de fallo de referencia para el modo de fallo de fatiga, a continuación, puede aumentarse el factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado, y se llevan a cabo las etapas de diseño de una

50

55

pala de rotor con corrección de gravedad y comparación de su probabilidad de fallo determinada para un modo de fallo de fatiga en relación con la probabilidad de fallo de referencia. Esto puede repetirse hasta que la pala diseñada tenga una probabilidad de fallo de gravedad corregida aceptable. Una vez que una pala diseñada satisface todos los requisitos en términos de integridad estructural, el método puede implicar la fabricación de una pala de rotor de acuerdo con el diseño determinado.

La figura 3 resume las etapas de un método 30 que puede usarse para garantizar que la pala del rotor diseñada tiene una probabilidad de fallo aceptable para un modo de fallo de fatiga. Como se indica en "A", las etapas de estos métodos pueden seguir los descritos en la figura 3. En la etapa 301, puede utilizarse un modelo de carga total definido para predecir una carga total indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador. Puede tratarse de un modelo de carga como el descrito anteriormente. En la etapa 302, puede usarse un modelo de carga de gravedad definido para predecir una carga de gravedad indicativa de la carga de fatiga debida a la gravedad de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador. Como se ha esbozado anteriormente, el modelo de carga de gravedad puede ser equivalente al modelo de carga total, pero con ciertos parámetros cambiados/ajustados a valores diferentes. A modo de ejemplo, la simulación de la carga de gravedad puede incluir el ajuste de uno o ambos parámetros de turbulencia y de cizalladura del viento en el modelo de carga para que sean iguales a, o sustancialmente iguales a, cero. Como alternativa, o adicionalmente, la simulación de la carga de gravedad puede incluir el aumento del valor de un parámetro de amortiguación estructural para las oscilaciones en sentido de batimiento y de borde de la pala del rotor diseñada en al menos un orden de magnitud, y preferentemente más.

En la etapa 303, puede determinarse una señal de carga eólica indicativa de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador. La señal de carga eólica puede determinarse en función de la carga total y la carga de gravedad. En la etapa 304, la probabilidad de fallo de gravedad corregida puede determinarse a continuación basándose en una ecuación de estado límite que incluye una incertidumbre asociada a una señal indicativa de la carga de gravedad y una incertidumbre asociada a la señal de carga eólica.

Una pala puede diseñarse según una ecuación de diseño como la descrita anteriormente. Como parte del proceso de diseño, se encuentra la cantidad de material utilizado. Esto está representado por el área  $A$ , de modo que  $G(A)$  haciéndose cero en la ecuación anterior corresponde a un "daño" de 1,0. Cabe señalar que, en esta ecuación, se utiliza el factor de seguridad de carga. A continuación, después de haber diseñado la pala, se puede calcular la probabilidad de fallo. Para ello se utiliza la ecuación de los estados límite descrita anteriormente. Cabe decir que aquí se usan distintas incertidumbres, según las variables  $X$  de la ecuación. El fallo de la pala se produce cuando  $g(t)$  se hace menor que cero, correspondiente a un nivel de daño superior a 1,0. Estas incertidumbres son variables estocásticas, es decir, están definidas por una distribución de probabilidad, por lo que  $g(t)$  es también una variable estocástica definida por una distribución de probabilidad. La probabilidad de fallo se determina a continuación determinando la probabilidad de que  $g(t)$  sea menor que cero para un valor definido de  $t$ , p. ej.,  $t = 20$  años.

Si la probabilidad de fallo de gravedad corregida es de una magnitud similar a, o menor que, la probabilidad de fallo de referencia, a continuación, se puede mantener el factor de seguridad de carga de gravedad actual, junto con la pala del rotor diseñada. Sin embargo, si la probabilidad de fallo corregida por la gravedad es mayor que el valor de referencia, a continuación, el proceso puede volver a la etapa 201 para seleccionar un factor de seguridad de carga de gravedad mayor y actualizado, y, a continuación, se repiten las etapas de las figuras 2 y 3 para este valor actualizado. Este proceso iterativo puede continuar hasta que se obtenga un factor de seguridad de carga de gravedad que tenga una probabilidad de fallo asociada de gravedad corregida que se considere aceptable (aunque siga siendo inferior a un factor de seguridad de carga estándar).

Como se ha esbozado anteriormente, la probabilidad de fallo de referencia puede determinarse con referencia a un diseño de pala (estándar) de acuerdo con un factor de seguridad de carga estándar. La figura 4 resume las etapas de un método 40 que puede utilizarse para determinar este valor de referencia de acuerdo con un ejemplo de la invención. Como se indica en "B", estas etapas del método pueden preceder a las descritas en la figura 2. En la etapa 401, una pala de rotor de aerogenerador (estándar) puede diseñarse de acuerdo con una carga de diseño "estándar" que se basa en un factor de seguridad de carga "estándar" asociado a la carga de fatiga de la pala de rotor de aerogenerador. Como se ha mencionado anteriormente, puede obtenerse de una norma industrial o de otras publicaciones, y puede ser igual a uno.

En la etapa 402, puede utilizarse un modelo de carga total definido para predecir o simular una carga total indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador. De nuevo, puede tratarse de un modelo de carga como el descrito anteriormente. En la etapa 403, puede utilizarse un modelo de carga de gravedad definido para predecir una carga de gravedad indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador. De nuevo, el modelo de carga de gravedad puede ser equivalente al modelo de carga total, pero con ciertos parámetros cambiados/ajustados a valores diferentes para minimizar o eliminar los efectos del viento en la carga de las palas.

En la etapa 404, una señal de carga eólica indicativa de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor

- estándar durante el funcionamiento del aerogenerador se determina en función de las cargas total y de gravedad para la pala de rotor estándar. Como se ha esbozado anteriormente, la señal de carga eólica puede ser una desviación típica de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador. En particular, esta señal de carga eólica de desviación típica puede determinarse en función de una desviación típica determinada de la carga de gravedad. A continuación, la carga de diseño de gravedad corregida puede determinarse en función del factor de seguridad de carga de gravedad aplicado a la desviación estándar de la carga de gravedad para la pala de rotor estándar y del factor de seguridad de carga eólica aplicado a la desviación estándar de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar.
- 5
- 10 En la etapa 405, se determina la probabilidad de fallo de referencia. En particular, esto puede ser una probabilidad de fallo de la pala de rotor estándar para el modo de fallo de fatiga debido a la desviación de la pala en dirección de batimiento. Específicamente, la probabilidad de fallo de referencia puede determinarse en función de una ecuación de estado límite que incluye una incertidumbre asociada a la señal de carga eólica para la pala de rotor estándar.
- 15 Pueden hacerse muchas modificaciones a los ejemplos descritos sin desviarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

- Lo descrito anteriormente describe un método de diseño de una pala de rotor de aerogenerador que utiliza un factor de seguridad de carga reducido para la parte gravitatoria de la carga de fatiga en comparación con un factor de seguridad de carga (estándar) para la parte eólica (o no gravitatoria) de la carga de fatiga, para reducir la cantidad de material necesario para la pala del rotor. Debe entenderse, sin embargo, que el enfoque descrito puede utilizarse en el diseño y la fabricación de otros componentes (estructurales) de aerogeneradores que deban diseñarse para soportar las cargas resultantes de los efectos de la gravedad y el viento. Dichos componentes estructurales pueden incluir un rodamiento principal o el bastidor de la góndola del aerogenerador. En general, los componentes estructurales que se ven influidos por las cargas del rotor del aerogenerador pueden diseñarse de acuerdo con el enfoque descrito en el presente documento. En particular, para un determinado componente estructural del aerogenerador, puede calcularse una probabilidad de fallo de referencia para un diseño estándar o inicial del componente estructural. La carga experimentada por el componente estructural puede entonces dividirse en una parte de gravedad y una parte de viento, de manera análoga al método descrito anteriormente. A continuación, se selecciona un factor de seguridad más bajo para la parte de viento (en relación con un factor de carga estándar). A continuación, se crea un nuevo diseño del componente estructural con la carga de diseño reducida. Se comprueba si la probabilidad de fallo del componente estructural de nuevo diseño es menor que, o igual a, una probabilidad de fallo de referencia. Como antes, este método puede realizarse de forma iterativa hasta obtener un diseño adecuado para el componente estructural. El alcance de la protección solicitada está definido por las reivindicaciones adjuntas.
- 20
- 25
- 30

REIVINDICACIONES

1. Un método de diseño de una pala de rotor de aerogenerador (10), comprendiendo el método:
  - 5 a) seleccionar (201) un factor de seguridad de carga de gravedad asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador debida a la gravedad, seleccionándose el factor de seguridad de carga de gravedad para ser menor que un factor de seguridad de carga eólica definido asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador que no es debida a la gravedad;
  - 10 b) determinar (202) una carga de diseño de gravedad corregida para la desviación de pala de rotor de aerogenerador, determinándose la carga de diseño de gravedad corregida en función del factor de seguridad de carga de gravedad seleccionado y del factor de seguridad de carga eólica definido; y,
  - 15 c) diseñar (203) una pala de rotor de aerogenerador de gravedad corregida de acuerdo con la carga de diseño de gravedad corregida determinada; y,
    - determinar una probabilidad de fallo de gravedad corregida de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada para un modo de fallo de fatiga debido a la desviación de pala; y,
    - si la probabilidad de fallo de gravedad corregida determinada es mayor que una probabilidad de fallo de referencia para el modo de fallo de fatiga, a continuación, el método comprende el aumento del factor de seguridad de carga
    - 20 de gravedad seleccionado y la repetición de las etapas b) y c).
2. Un método según la reivindicación 1, en donde la determinación de la probabilidad de fallo de gravedad corregida comprende la especificación de una dirección (105, 106) de desviación de pala para el modo de fallo de fatiga.
- 25 3. Un método según la reivindicación 2, comprendiendo el método:
  - utilizar un modelo de carga total definido para predecir una carga total (301) indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador;
  - utilizar un modelo de carga de gravedad definido para predecir una carga de gravedad (302) indicativa de la carga de fatiga debida a la gravedad de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del
  - 30 aerogenerador; y,
  - determinar una señal de carga eólica (303) indicativa de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor de gravedad corregida diseñada durante el funcionamiento del aerogenerador, determinándose la señal de carga eólica en función de la carga total y de la carga de gravedad,
  - en donde la probabilidad de fallo de gravedad corregida se determina en función de una ecuación de estado límite que incluye una incertidumbre asociada a una señal indicativa de la carga de gravedad y una incertidumbre asociada a la
  - 35 señal de carga eólica.
4. Un método de según con la reivindicación 3, en donde definir el modelo de carga de gravedad comprende establecer uno o más parámetros del modelo de carga total definido de la siguiente manera:
  - 40 establecer un parámetro de turbulencia igual a, o sustancialmente igual a, cero;
  - establecer un parámetro de cizalladura del viento igual a, o sustancialmente igual a, cero;
  - aumentar el valor de un parámetro de amortiguación estructural de las oscilaciones en sentido de batimiento y de borde de la pala de rotor diseñada en al menos un orden de magnitud, y preferentemente en al menos dos órdenes
  - 45 de magnitud.
5. Un método según cualquier reivindicación anterior, comprendiendo el método:
  - diseñar una pala de rotor de aerogenerador estándar de acuerdo con una carga de diseño estándar que se basa en un factor de seguridad de carga estándar asociado a la carga de fatiga de pala de rotor de aerogenerador; y,
  - determinar la probabilidad de fallo de referencia como probabilidad de fallo de la pala de rotor estándar para el
  - 50 modo de fallo de fatiga debido a la desviación de la pala en una dirección de batimiento.
6. Un método según la reivindicación 5, comprendiendo el método:
  - utilizar un modelo de carga total definido para predecir una carga total indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador;
  - 55 utilizar un modelo de carga de gravedad definido para predecir una carga de gravedad indicativa de la carga de fatiga de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador; y,
  - determinar una señal de carga eólica indicativa de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador en función de las cargas total y de gravedad de la pala de rotor estándar,
  - en donde la probabilidad de fallo de referencia se determina en función del factor de seguridad de carga estándar aplicado a una incertidumbre asociada a la señal de carga eólica para la pala de rotor estándar.
  - 60
7. Un método de según con la reivindicación 6, en donde el factor de seguridad de carga eólica se define para ser igual al factor de seguridad de carga estándar; opcionalmente, en donde el factor de seguridad de carga estándar se obtiene de una norma industrial; opcionalmente, además, en donde el factor de seguridad de carga estándar es igual a uno.
- 65

5 8. Un método según la reivindicación 6 o la reivindicación 7, en donde la carga de diseño de gravedad corregida se determina en función del factor de seguridad de carga de gravedad aplicado a una señal indicativa de la carga de gravedad para la pala de rotor estándar y del factor de seguridad de carga eólica aplicado a la señal de carga eólica para la pala de rotor estándar.

10 9. Un método de según con la reivindicación 8, en donde la señal de carga eólica es una desviación típica de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar durante el funcionamiento del aerogenerador, en donde la señal de carga eólica se determina en función de una desviación típica determinada de la carga de gravedad, y en donde la carga de diseño de gravedad corregida se determina en función del factor de seguridad de carga de gravedad aplicado a la desviación típica de la carga de gravedad para la pala de rotor estándar y del factor de seguridad de carga eólica aplicado a la desviación típica de la carga de fatiga no debida a la gravedad de la pala de rotor estándar.

15 10. Un método de según con la reivindicación 9, en donde la desviación típica  $\sigma_{ag}$  de la carga de gravedad se obtiene según

$$L_{\alpha g}^m N_{ref} = (2\sqrt{2}\sigma_{\alpha g})^m f_g T_L$$

20 donde  $m$  es la pendiente considerada de una curva SN,  $T_L$  es la vida útil de diseño de la pala de rotor,  $L_{\alpha g}$  es la carga de gravedad para un número de referencia de ciclos de carga  $N_{ref}$ , y  $f_g$  es una frecuencia de una señal de carga sinusoidal correspondiente a una frecuencia de la carga de gravedad.

25 11. Un método de según con la reivindicación 10, en donde la desviación típica  $\sigma_{aw}$  de la carga de fatiga no debida a la gravedad se obtiene según

$$L_{\alpha}^m N_{ref} = (2\sqrt{2}\sigma_{\alpha g})^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) M\left(-\frac{m}{2}, 1, -\left(\frac{\sigma_{\alpha g}}{\sigma_{\alpha w}}\right)^2\right) v T_L$$

30 donde  $L_{\alpha}$  es la carga total para el número de referencia de ciclos de carga  $N_{ref}$ ,  $M(\cdot, \cdot, \cdot)$  es una función hipergeométrica confluyente, y  $v$  es una frecuencia promedio de ciclos de carga.

12. Un método según cualquier reivindicación anterior, en donde el factor de seguridad de carga de gravedad se selecciona para ser igual, o aproximadamente igual a, 0,9; opcionalmente, cuando depende de la reivindicación 2, en donde el factor de seguridad de carga de gravedad se incrementa en un valor de aproximadamente 0,01.

35 13. Un método según cualquier reivindicación anterior, el método comprende la fabricación de la pala de rotor de aerogenerador diseñada de acuerdo con la carga de diseño de gravedad corregida determinada.

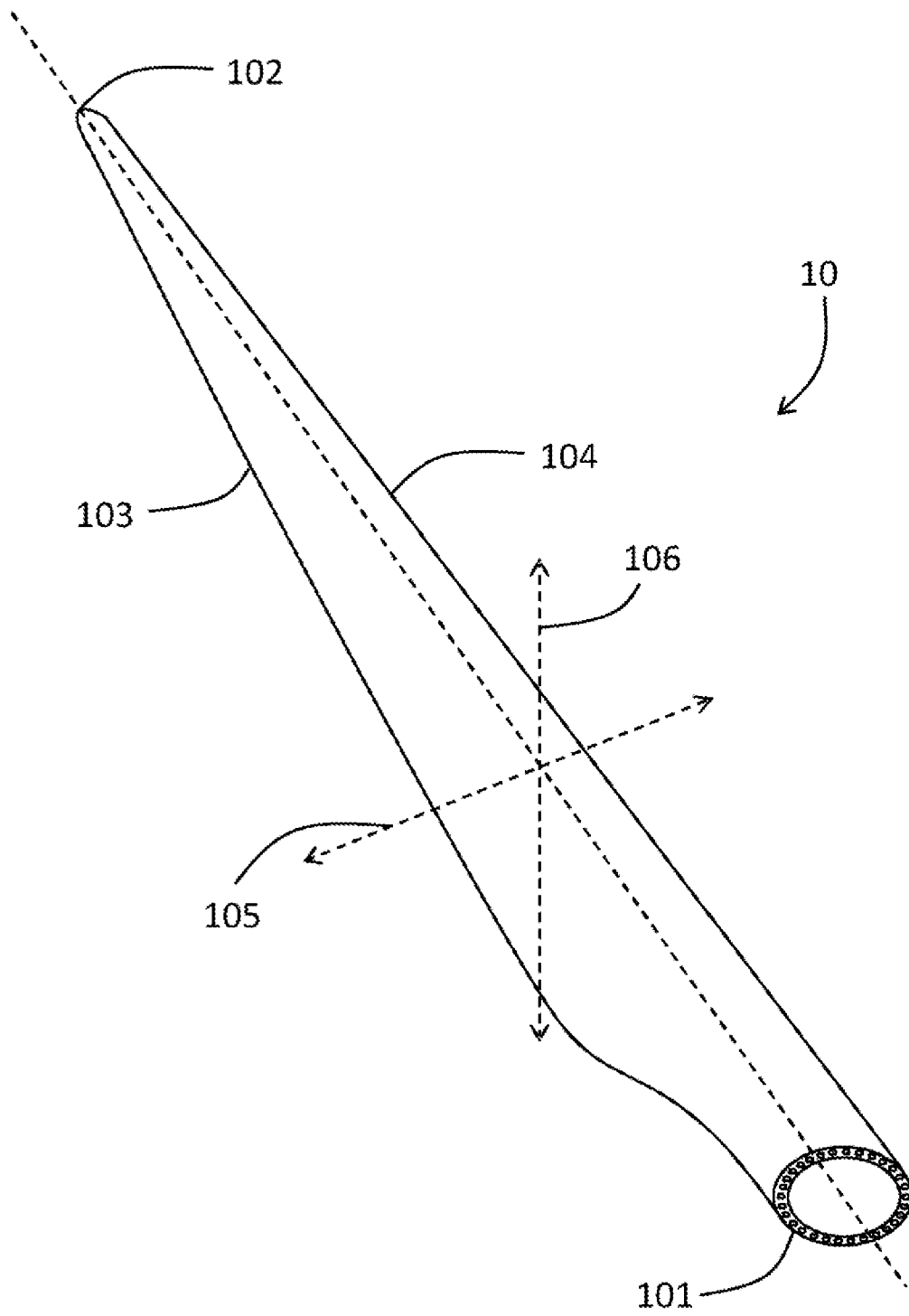


FIG. 1

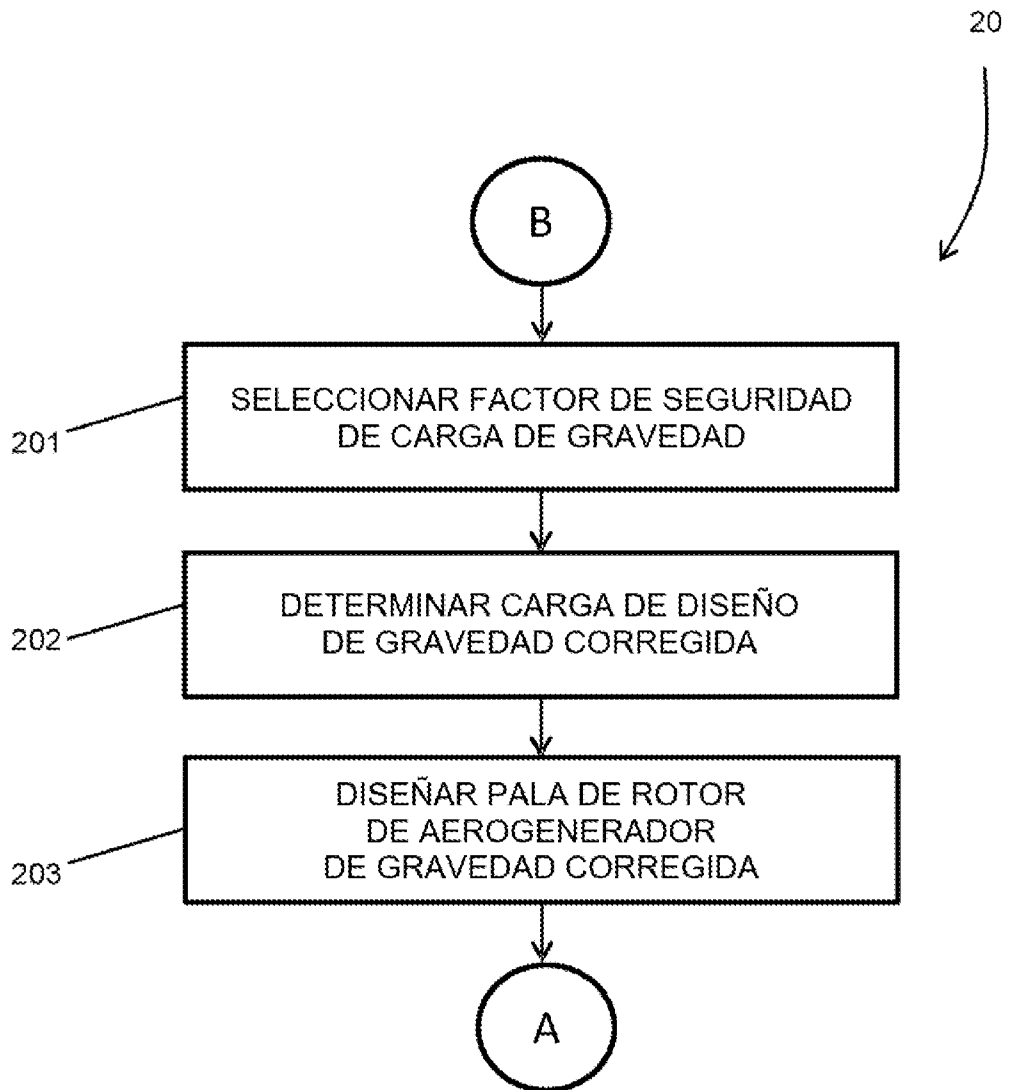


FIG. 2

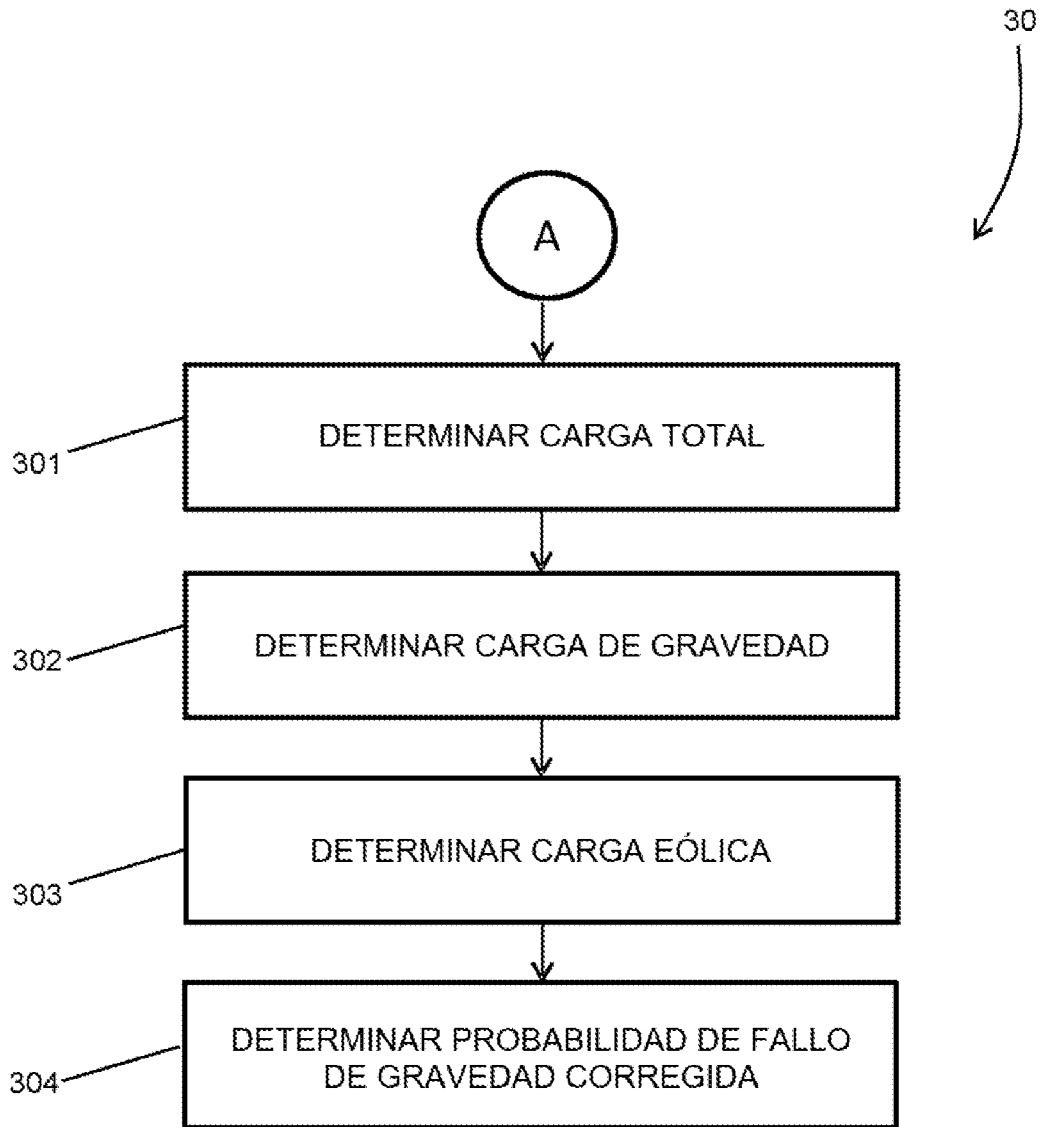


FIG. 3

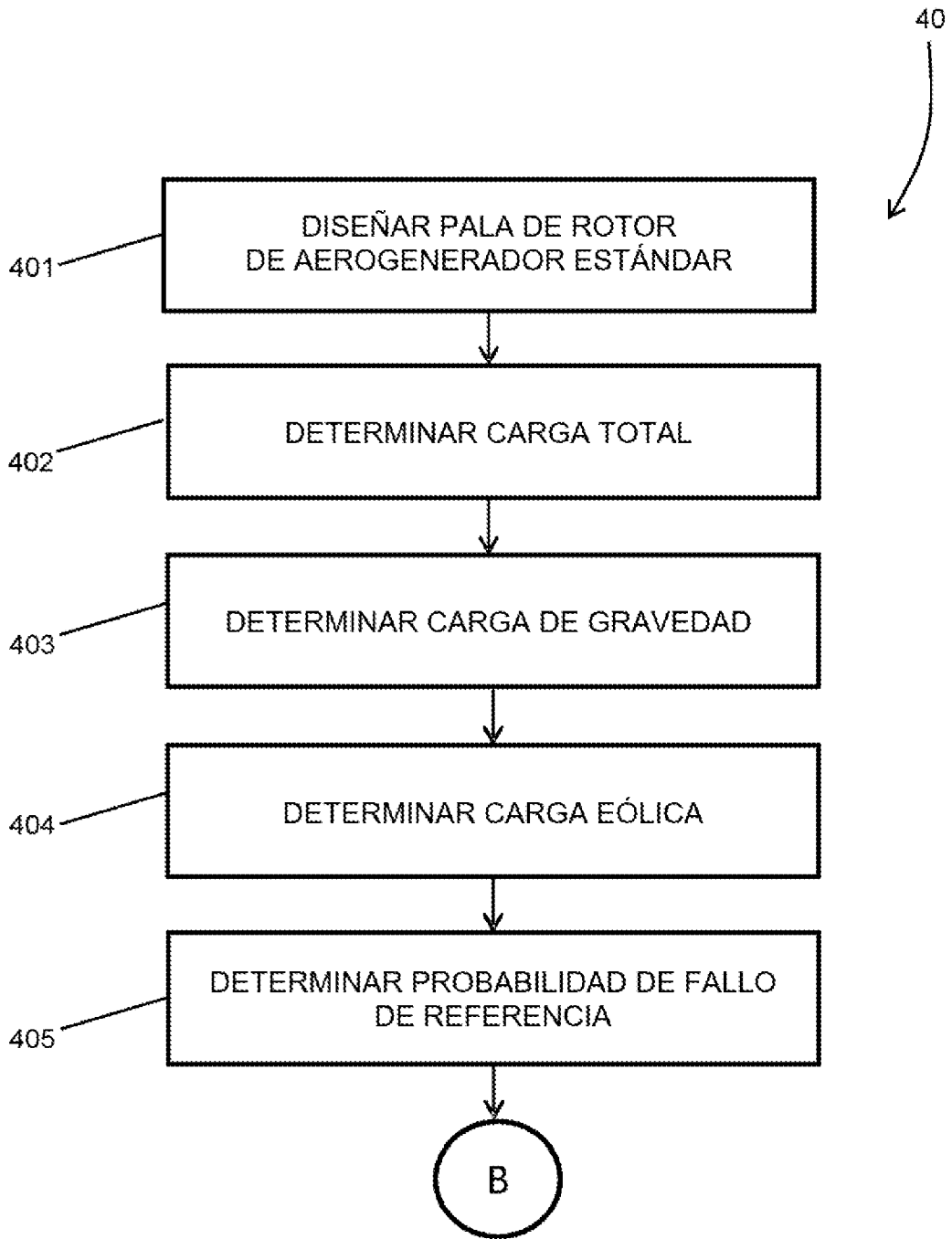


FIG. 4