

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 646 621**

51 Int. Cl.:

**F03D 17/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.09.2014** E 14184601 (4)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.08.2017** EP 2995813

54 Título: **Un sistema y método para determinar la flexión de una pala de turbina eólica**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.12.2017**

73 Titular/es:

**LM WP PATENT HOLDING A/S (100.0%)  
Jupitervej 6  
6000 Kolding, DK**

72 Inventor/es:

**BÆK, PETER;  
KLITGAARD, MICHAEL y  
BYSKOV, CLAUS**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

**ES 2 646 621 T3**

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

## DESCRIPCIÓN

Un sistema y método para determinar la flexión de una pala de turbina eólica

Campo de la invención

La presente invención se refiere a un sistema y método para determinar una flexión de una pala de turbina eólica.

### 5 Antecedentes de la invención

Durante la operación de una turbina eólica, actúan fuerzas considerables sobre las palas de la turbina eólica, que doblan y flexionan las palas. Dicha flexión puede ser tan extrema que provoque que las puntas de pala de la turbina eólica golpeen la torre de la turbina eólica, provocando de ese modo daños a la pala o incluso el fallo completo de la estructura de la turbina eólica.

- 10 En los esfuerzos para reducir el riesgo de golpeo en la torre, los fabricantes de turbinas eólicas han utilizado diferentes técnicas en la construcción de turbinas eólicas. En algunos casos, las turbinas eólicas usan palas precurvadas, que tienen extremos de punta que se proyectan afuera de la torre de la turbina eólica, incrementando de ese modo el espacio libre desde la punta a la torre. Adicional o alternativamente, los fabricantes de turbinas eólicas diseñan las turbinas eólicas para que tengan un ángulo de inclinación y/o una distancia desde la torre al rotor de la
- 15 turbina eólica incrementado. Dichas soluciones presentan complicaciones adicionales en el área del coste y dificultades constructivas.

- Una opción adicional es supervisar con precisión la localización del extremo de punta de las palas de turbina eólica, y controlar la turbina eólica en consecuencia. Por ejemplo, si la localización de la punta de una pala se detecta que se ha flexionado hacia la torre en un grado tal que hay peligro de un golpe en la torre, puede controlarse la turbina
- 20 eólica para cambiar el paso de la pala de la turbina eólica para mover el extremo de punta de la pala separándole de la torre. En casos extremos, la turbina eólica puede detenerse completamente para impedir un golpe en la torre.

- Dicha supervisión posicional se realiza frecuentemente usando un sistema de triangulación o de trilateración, lo que puede requerir la supervisión del extremo de punta de una pala de turbina eólica desde dos-tres localizaciones separadas, con el cálculo posterior de la localización del extremo de punta. Un ejemplo de dicho sistema se describe
- 25 en la Publicación de Solicitud de Patente Europea N.º EP 1706638. Sin embargo, uno de los desafíos con dichos sistemas es asegurar una operación continua, fiable, y precisa de los sistemas de supervisión.

Es un objetivo de la invención proporcionar un sistema alternativo de supervisión de la flexión de las palas, que tenga una fiabilidad y precisión mejoradas.

Sumario de la invención

- 30 En consecuencia, se proporciona un método para el cálculo de un perfil de flexión de las palas de una pala de turbina eólica que tenga un sistema de supervisión de la flexión de las palas, comprendiendo el método las etapas de:

proporcionar una pala de turbina eólica que tenga un perfil modal conocido;

- 35 medir la distancia entre al menos una localización raíz hacia un extremo de raíz de la pala de turbina eólica y al menos una localización de punta hacia un extremo de punta de la pala de turbina eólica; y

calcular un perfil de flexión de la pala basándose en la distancia medida entre dichas localizaciones de raíz y punta y dicho perfil modal conocido.

- Mediante la utilización de un perfil modal conocido de una pala de turbina eólica en el sistema de supervisión de flexión de la pala, puede mejorarse la precisión del sistema de supervisión de la flexión. Usando una única medición
- 40 de distancia entre posiciones conocidas de una pala, puede calcularse un perfil de flexión de pala preciso basándose en las formas de los modos predichos de la pala de turbina eólica. En consecuencia, puede mejorarse la precisión del sistema de supervisión de la flexión, dado que puede funcionar usando solamente una única medición de distancia.

- Preferentemente, dicho perfil de flexión de pala se usa como una entrada a un sistema de seguridad de la turbina eólica, en el que dicho perfil de flexión de la pala se usa para calcular si la flexión de dicha pala de turbina eólica
- 45 excede un umbral de seguridad para un golpe en la torre, y/o cuando la pala de la turbina eólica está en riesgo de superar una envolvente de seguridad de diseño de la turbina eólica.

La determinación de un perfil de flexión de la pala permite el cálculo de la localización de un extremo de punta de la pala. En consecuencia, es posible estimar si una punta de la pala se flexionará hacia una torre de la turbina eólica, y juzgar si dicha flexión excede un margen de seguridad para el golpeo de la punta de la pala en la torre de la turbina eólica. Se entenderá que el método puede comprender adicionalmente la etapa de generar una señal de control basándose en dicho cálculo o si la flexión de dicha pala de turbina eólica excede un umbral de seguridad para un golpe en la torre. Dicha señal de control puede usarse como una entrada para un sistema de control de la turbina eólica, que puede ser operativo para ajustar el rendimiento de la turbina eólica basándose en dicho cálculo, por ejemplo para ajustar un ángulo de paso de una pala de turbina eólica para reducir el riesgo de un golpe en la torre, o para detener la operación de la turbina para impedir un golpe en la torre. En un aspecto adicional o alternativo, dado que las turbinas eólicas se diseñan en general para satisfacer límites de seguridad de certificación particulares para la operación de la turbina, es importante que la operación de las turbinas no exceda dichos límites de seguridad. En consecuencia, el sistema de supervisión de la flexión de la invención puede disponerse como una entrada a un controlador de turbina para ajustar la operación de la turbina de modo que no se excedan dichos límites de seguridad. Por ejemplo, para un diseño de turbina eólica en el que la rigidez de las turbinas eólicas se reduce, el sistema de supervisión de la flexión de palas de la invención puede disponerse para asegurar que la turbina opera dentro de la envolvente de carga de diseño para la turbina.

En un aspecto adicional, el método comprende la etapa de proporcionar un enlace de comunicación inalámbrico entre dicha al menos una localización de raíz y dicha al menos una localización de punta, preferentemente un enlace inalámbrico de comunicación por radio.

Aunque el sistema puede emplearse usando enlaces por gestión de imágenes ópticas, por ejemplo un sistema de supervisión por láser, preferentemente la medición de la distancia se realiza usando un enlace de comunicaciones por radiofrecuencia, por ejemplo usando un cálculo del tiempo de vuelo de la señal para determinar una medición de distancia. Preferentemente, el enlace de comunicación por radio inalámbrico se realiza usando sistemas de radio de banda ultra ancha (UWB), lo que permite mediciones de baja potencia, alta precisión.

Preferentemente, el método comprende la etapa de proporcionar una primera y segunda localizaciones de raíz, y/o primera y segunda localizaciones de punta, en el que dicha etapa de cálculo de un perfil de flexión de la pala se basa en una distancia medida entre la combinación de localización de raíz y localización de punta particular que tenga la mejor intensidad de señal, calidad de señal, y/o línea de visión (RF).

Durante el giro de la pala, la pala puede doblarse en diferentes direcciones dando como resultado interrupciones o perturbaciones del enlace de comunicación inalámbrico entre la raíz y el extremo de punta. Al proporcionar múltiples enlaces de comunicación posibles, en consecuencia la medición de distancia puede realizarse entre las localizaciones de raíz y punta que tengan la mejor calidad y/o intensidad de señal, lo que puede dar como resultado una medición de distancia más precisa.

En un aspecto adicional, el método comprende la etapa de calibrar un sistema de supervisión de la flexión de la pala, en el que dicha calibración comprende la realización de una operación de triangulación o trilateración entre dicha primera y segunda localizaciones de raíz y dicha al menos una localización de punta.

Debido a una deriva operativa, puede ser útil tener la capacidad de recalibrar el sistema de supervisión de la flexión de pala durante la operación. Dicha recalibración puede realizarse por medio de una triangulación o trilateración de relativamente alta precisión, usando una pluralidad de elementos de localización. Las localizaciones de raíz pueden disponerse para proporcionar al sistema un grado de redundancia relativa al doblado de la pala. Por ejemplo, puede disponerse una primera localización raíz hacia un borde de ataque de la pala de turbina eólica, mientras que una segunda localización de raíz puede disponerse hacia un borde de salida de la pala de turbina eólica.

En un aspecto preferido, el método comprende proporcionar al menos primera y segunda localizaciones de punta, en el que una primera localización se dispone próxima a un extremo de punta de una pala de turbina eólica y una segunda localización de punta se localiza en el nodo de una segunda forma de modo de la pala de turbina eólica.

Preferentemente, el método comprende las etapas de:

medir una primera distancia desde dicha al menos una localización de raíz a dicha primera localización de punta;

medir una segunda distancia desde dicha al menos una localización de raíz a dicha segunda localización de punta; y

calcular un perfil de flexión de la pala basándose en dicha primera y segunda distancias y dicho perfil modal conocido.

Posicionar una segunda localización de punta en el nodo de la segunda forma de modo de la pala permite que el primer y segundo modos de la pala se desacoplen entre sí. Dado que es posible aislar el efecto de la segunda forma

de modo de la primera forma de modo, en consecuencia, se mejora la precisión del cálculo de flexión de la pala.

Preferentemente, el método comprende las etapas de:

medir una distancia entre dos localizaciones conocidas de una pala de turbina eólica;

calcular una amplitud del modo de la pala basándose en dicha distancia medida; y

- 5 determinar la forma de modo de pala excitado de la pala de turbina eólica usando dicha amplitud de modo de pala calculada.

La forma del modo de pala excitada puede usarse para determinar la forma actual de la pala de turbina eólica, y preferentemente puede usarse para determinar una localización del extremo de punta de la pala de turbina eólica.

- 10 En un aspecto, dicha etapa de cálculo de una amplitud del modo de pala se realiza continuamente cuando la pala de la turbina eólica está operativa sobre una turbina eólica. También se entenderá que el cálculo puede realizarse a intervalos, y/o cuando la pala de la turbina eólica está en ciertas posiciones a lo largo de la trayectoria giratoria de la pala, por ejemplo, antes de que la pala pase sobre la torre de la turbina eólica.

- 15 Preferentemente, el método comprende la etapa de calcular una posición de una localización de punta conocida sobre una pala de turbina eólica cuando dicha pala de turbina eólica se flexiona o excita, en el que el método comprende las etapas de:

definir una localización de raíz hacia un extremo de raíz de la pala de turbina eólica;

definir una localización de punta hacia un extremo de punta de la pala de turbina eólica; y

- 20 definir una localización intermedia entre dicha localización de raíz y dicha localización de punta, en el que dicha localización intermedia se posiciona en un punto en el que, durante la excitación de la pala, dicha localización de punta se mueve sustancialmente a lo largo de un círculo teórico centrado aproximadamente en dicha localización intermedia,

en el que la distancia entre dicha localización de raíz y dicha localización intermedia es conocida (la distancia raíz-intermedia), y en el que la distancia entre dicha localización intermedia y dicha localización de punta es conocida (la distancia intermedia-punta), comprendiendo el método adicionalmente las etapas de:

- 25 medir la distancia entre dicha localización de raíz y dicha localización de punta durante la excitación de la pala de turbina eólica; y

calcular la posición de dicha localización de punta durante la excitación de la pala de turbina eólica basándose en un cálculo de trilateración, usando la distancia raíz-intermedia conocida, la distancia intermedia-punta conocida, y la distancia raíz-punta medida.

- 30 Se entenderá que la localización intermedia puede seleccionarse para ser una aproximación del punto central de un círculo teórico alrededor del que se mueve la localización de punta durante la excitación. En consecuencia, la distancia intermedia-punta se fija para ser aproximadamente el radio de dicho círculo teórico. Mediante el cálculo de la posición de la localización de punta durante la excitación o flexión de la pala, es posible calcular o extrapolar la posición de punta de la pala.

- 35 Se entenderá también que la amplitud del modo de la pala, la forma del modo de pala excitado, y/o localización de punta de la pala pueden precalcularse para al menos algunos valores de distancias medidas entre dos localizaciones conocidas en una pala de turbina eólica, en la que dichos valores precalculados pueden almacenarse en un dispositivo de almacenamiento y estar accesibles durante la operación de una pala de turbina eólica, por ejemplo en una tabla de búsqueda adecuada.

- 40 Mediante el precálculo de la amplitud del modo, la forma del modo y/o la localización de la punta para al menos algunas distancias medidas, puede incrementarse la velocidad de procesamiento del método, conduciendo a una mayor capacidad de respuesta del sistema.

- 45 Se proporciona adicionalmente un método de control de una turbina eólica, en el que la turbina eólica se controla basándose en dicho perfil de flexión de pala calculado, y/o en una señal de control generada por un sistema de supervisión de la flexión de la pala.

El control de la turbina eólica puede comprender el ajuste de un ángulo de paso de la pala, ángulo de orientación de la turbina, capacidad del generador. En un aspecto, la turbina puede controlarse para realizar una parada de emergencia de la turbina eólica.

5 Se proporciona adicionalmente un sistema de supervisión de la flexión de la pala para una pala de turbina eólica dispuesta para implementar cualquier aspecto de lo descrito anteriormente.

Se proporciona también un sistema de supervisión de la flexión de la pala para una pala de turbina eólica, comprendiendo el sistema:

al menos un elemento de punta a ser dispuesto en una localización hacia el extremo de punta de una pala de turbina eólica;

10 al menos un elemento de raíz a ser dispuesto en una localización hacia el extremo de raíz de una pala de turbina eólica;

un sistema de medición de distancia dispuesto para medir una distancia entre dicho al menos un elemento de punta y dicho al menos un elemento de raíz; y

15 un controlador dispuesto para recibir un perfil modal para una pala de turbina eólica, operativo el controlador para calcular un perfil de flexión de la pala basándose en la distancia medida entre dichas localizaciones de raíz y punta y dicho perfil modal.

Se proporciona adicionalmente un controlador de pala de turbina eólica operativo para controlar la operación de una turbina eólica basándose en un perfil de flexión de pala calculado, y/o en una señal de control generada por un sistema de supervisión de la flexión de la pala.

20 Se proporciona adicionalmente una turbina eólica que comprende al menos una pala de turbina eólica que tiene un sistema de supervisión de flexión de la pala tal como se ha descrito anteriormente, y/o un controlador de pala de turbina eólica tal como se ha descrito anteriormente.

Descripción de la invención

25 Se describirán ahora realizaciones de la invención, solamente a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la Fig. 1 muestra una turbina eólica;

la Fig. 2 muestra una vista esquemática de una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención;

la Fig. 3 muestra una vista esquemática de un perfil aerodinámico de la pala de la Fig. 2;

la Fig. 4 muestra una vista esquemática de la pala de turbina eólica de la Fig. 2, vista desde arriba y desde el lateral;

30 la Fig. 5 ilustra un diagrama de proceso para un método para la determinación de una flexión de pala de acuerdo con la invención; y

la Fig. 6 ilustra un método de cálculo de una flexión de pala basándose en una distancia medida y un perfil modal de la pala.

35 Se entenderá que elementos comunes a las diferentes realizaciones de la invención se han provisto con los mismos números de referencia en los dibujos.

La Fig. 1 ilustra una turbina eólica 2 frente al viento moderna de acuerdo con el denominado "Concepto danés" con una torre 4, una góndola 6 y un rotor con un árbol de rotor sustancialmente horizontal. El rotor incluye un buje 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente desde el buje 8, cada una teniendo una raíz de pala 16 próxima al buje y una punta de pala 14 la más alejada desde el buje 8. El rotor tiene un radio indicado por R.

40 La Fig. 2 muestra una vista esquemática de una pala 10 de turbina eólica. La pala 10 de turbina eólica tiene la forma de una pala de turbina eólica convencional y comprende una zona de raíz 30 más cercana al buje, una zona perfilada o aerodinámica 34 la más alejada del buje y una zona de transición 32 entre la zona de raíz 30 y la zona aerodinámica 34. La pala 10 comprende un borde de ataque 18 que mira en la dirección de giro de la pala 10, cuando la pala se monta sobre el buje, y un borde de salida 20 que mira en la dirección opuesta al borde de ataque

18.

La zona aerodinámica 34 (también llamada la zona perfilada) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a la generación de empuje, mientras que la zona de raíz 30 debido a consideraciones estructurales tiene una sección transversal sustancialmente circular o elíptica, que por ejemplo hace más fácil y más seguro montar la pala 10 en el buje. El diámetro (o la cuerda) de la zona de raíz 30 es típicamente constante a lo largo de toda el área de raíz 30. La zona de transición 32 tiene un perfil de transición 42 que cambia gradualmente desde la forma circular o elíptica 40 de la zona de raíz 30 al perfil aerodinámico 50 de la zona aerodinámica 34. La longitud de cuerda de la zona de transición 32 se incrementa típicamente de modo sustancialmente lineal con el incremento de la distancia  $r$  desde el buje.

- 5 10 La zona aerodinámica 34 tiene un perfil 50 con una cuerda que se extiende entre el borde de ataque 18 y el borde de salida 20 de la pala 10. El ancho de la cuerda disminuye con el incremento de la distancia  $r$  desde el buje.

Debería observarse que las cuerdas de diferentes secciones de la pala no reposan normalmente en un plano común, dado que la pala puede retorcerse y/o curvarse (es decir doblado previo), proporcionando así al plano de la cuerda con una trayectoria retorcida y/o curvada, siendo este el caso más frecuente para compensar que la velocidad local de la pala dependa del radio desde el buje.

- 15

La Fig. 3 muestra una vista esquemática de un perfil aerodinámico 50 de una pala típica de una turbina eólica representada con varios parámetros, que se usan típicamente para definir la forma geométrica de un perfil aerodinámico. El perfil aerodinámico 50 tiene un lado de presión 52 y un lado de succión 54, que durante el uso —es decir durante la rotación del rotor— miran normalmente hacia el lado de barlovento (o frente al viento) y al lado de sotavento (o a favor de viento), respectivamente. El perfil aerodinámico 50 tiene una cuerda 60 con una longitud de cuerda  $c$  que se extiende entre un borde de ataque 56 y un borde de salida 58 de la pala. El perfil aerodinámico 50 tiene un grosor  $t$ , que se define como la distancia entre el lado de presión 52 y el lado de succión 54. El grosor  $t$  del perfil aerodinámico varía a lo largo de la cuerda 60. La desviación respecto a un perfil simétrico viene dada por una línea de combadura 62, que es una línea media a través del perfil aerodinámico 50. La línea media puede hallarse mediante el dibujo de círculos inscritos desde el borde de ataque 56 al borde de salida 58. La línea media sigue los centros de estos círculos inscritos y la desviación o distancia desde la cuerda 60 se llama combadura  $f$ . La asimetría también puede definirse mediante el uso de parámetros llamados combadura superior (o combadura del lado de succión) y combadura inferior (o combadura del lado de presión), que se definen como las distancias desde la cuerda 60 y el lado de succión 54 y el lado de presión 52, respectivamente.

- 20 25

- 30 Los perfiles aerodinámicos se caracterizan frecuentemente por los siguientes parámetros: la longitud de cuerda  $c$ , la combadura máxima  $f$ , la posición  $d_f$  de la combadura máxima  $f$ , el grosor de perfil aerodinámico máximo  $t$ , que es el diámetro mayor de los círculos inscritos a lo largo de la línea de combadura media 62, la posición  $d_t$  del grosor máximo  $t$ , y un radio de punta (no mostrado). Estos parámetros se definen típicamente como relaciones respecto a la longitud de cuerda  $c$ . Por ello, un grosor de pala relativo local  $t/c$  viene dado como la relación entre el grosor máximo local  $t$  y la longitud de cuerda local  $c$ . Adicionalmente, la posición  $d_p$  de la combadura máxima en el lado de presión puede usarse como un parámetro de diseño, y naturalmente también la posición de la combadura máxima en el lado de succión.

- 35

La Fig. 4 muestra algunos otros parámetros geométricos de la pala. La pala tiene una longitud de pala total  $L$ . Tal como se muestra en la Fig. 2, el extremo de raíz se localiza en la posición  $r = 0$ , y el extremo de punta se localiza en  $r = L$ . El apoyo 40 de la pala se localiza en una posición  $r = L_w$ , y tiene un ancho de apoyo  $W$ , que es igual a la longitud de cuerda en el apoyo 40. El diámetro de la raíz se define como  $D$ . Adicionalmente, La pala se proporciona con un curvado previo, que se define como  $\Delta y$ , que se corresponde a la flexión fuera del plano desde un eje de cambio de paso 22 de la pala.

- 40

La pala 10 de turbina eólica comprende generalmente una concha fabricada de polímero reforzado con fibra, y se fabrica típicamente como una parte de concha 24 del lado de presión o frente al viento y una parte de concha 26 del lado de succión o hacia el viento que se encolan juntas a lo largo de líneas de unión 28 que se extienden a lo largo del borde de salida 20 y del borde de ataque 18 de la pala 10. Las palas de turbina eólica se forman en general a partir de un material plástico reforzado con fibra, por ejemplo fibras de vidrio y o fibras de carbono que se disponen en un molde y se curan con una resina para formar una estructura sólida. Las palas de turbina eólica moderna pueden frecuentemente superar los 30 o 40 m de longitud, teniendo diámetros de raíz de pala de varios metros. Las palas de turbina eólica se diseñan en general para relativamente largas vidas útiles y para soportar considerable carga estructural y dinámica.

- 45 50

En una publicación de solicitud de patente internacional N.º WO14027032, se describe un sistema de supervisión de la flexión de pala en el que al menos se proporciona un dispositivo inalámbrico de comunicaciones hacia la raíz de una pala de turbina eólica, para comunicación con al menos un dispositivo inalámbrico de comunicaciones localizado hacia la punta de la pala. Los dispositivos inalámbricos de comunicaciones forman preferentemente una red de

- 55

comunicaciones de banda ultra ancha (UWB). Preferentemente, el sistema y método de la invención se implementa usando dicha configuración, pero se entenderá que la invención puede implementarse igualmente usando otros tipos de configuraciones de supervisión de flexión de pala, por ejemplo medición de distancia basada en láser, dispositivos localizadores de posición discretos separados, etc.

5 Con referencia a la Fig. 5, se muestra un método para la determinación de la flexión de una pala de turbina eólica de acuerdo con la invención. La pala 10 de turbina eólica y/o la turbina eólica 2 pueden proporcionarse con un controlador adecuado (no mostrado) operativo para determinar la flexión de la pala de turbina eólica. Dicho controlador puede proporcionarse como parte de un controlador de turbina eólica general, o puede proporcionarse como parte de un sistema de supervisión de datos separado, que puede disponerse para proporcionar una señal de  
10 entrada a un controlador de turbina eólica.

Como parte de la invención, se proporciona una pala 10 de turbina eólica en el que el perfil de modo de la pala ya es conocido, etapa 100. El conocimiento del perfil modal puede desarrollarse a partir de información proporcionada durante el proceso de diseño inicial para la pala de la turbina eólica, y/o a partir de mediciones realizadas en una etapa de ensayo inicial, por ejemplo durante los ensayos dinámicos de una pala de turbina eólica, previamente al  
15 suministro y a un montaje posterior sobre una turbina eólica. El perfil modal puede comprender una serie de reglas que determinan la forma de la pala para una matriz de niveles de excitación, y/o una serie de formas de pala que pueden tener lugar durante la flexión. La forma del modo puede ser una función de la longitud de la pala de turbina eólica.

Tener conocimiento de las características modales de la pala de turbina eólica permite un trazado del perfil adecuado de la forma de la pala de la turbina eólica durante la operación de la turbina eólica. En consecuencia, dicho conocimiento predeterminado de las características de la pala permiten que se calcule un perfil de flexión para una pala de turbina eólica basándose en un número reducido de entradas de sensores cuando se compara con sistemas de la técnica anterior.

Una vez se proporciona la pala 10 de turbina eólica que tiene un perfil modal conocido, se definen una serie de localizaciones en el extremo de raíz 16 y el extremo de punta 14 de la pala 10, etapa 102. Estas localizaciones se determinan como puntos sobre la pala 10 que pueden usarse para proporcionar información tal como la forma de modo de pala actual de la pala 10 de turbina eólica. Las localizaciones se disponen a una distancia establecida a lo largo de la longitud de la pala 10 de turbina eólica, de modo que cualquier cambio en la distancia entre las dos localizaciones es resultado de la flexión de la pala de turbina eólica 10.

Preferentemente, la localización del extremo de raíz se dispone en un punto sobre la pala 10 de turbina eólica que se espera no quede afectado por la flexión de la pala, mientras que la localización del extremo de punta se dispone en un punto sobre la pala de la turbina eólica en el que se espera la flexión de pala mayor. Preferentemente, la localización del extremo de punta se posiciona estrechamente adyacente a o en el extremo de punta 14 de la pala 10, mientras que la localización del extremo de raíz se posiciona estrechamente adyacente a o en el extremo de raíz  
35 16 de la pala 10. En una realización alternativa, la localización del extremo de raíz puede posicionarse sobre el buje del rotor 8 de la turbina eólica 2, adyacente al extremo de raíz 16 de la pala 10 de turbina eólica y dispuesta para girar conjuntamente con la pala 10 de turbina eólica.

Durante la operación de la turbina eólica, el método comprende la etapa de supervisar la distancia entre las localizaciones de raíz y punta predeterminadas, etapa 104. Preferentemente, la supervisión comprende la medición de una distancia usando un enlace inalámbrico de comunicación por radio, pero se entenderá que pueden usarse otros métodos para supervisar la distancia entre las localizaciones, por ejemplo un sistema de supervisión del alcance basado en luz o láser. Alternativamente, puede supervisarse la posición de las localizaciones de raíz y punta, usando por ejemplo localizadores GPS u otros dispositivos de supervisión de posición similares, y determinando la distancia entre las localizaciones basándose en el cambio de la posición. Más alternativamente,  
45 puede establecerse un enlace de comunicaciones entre las localizaciones de raíz y punta, en el que un cambio en las características del enlace de comunicaciones, tal como la fase de la señal y o la intensidad de la señal de un enlace de comunicaciones inalámbrico, puede usarse como un indicador de las localizaciones de raíz y punta que se mueven o bien acercándose o bien alejándose entre sí.

Con la distancia entre las localizaciones de raíz y punta predeterminadas establecida, es posible calcular la flexión de la pala 10 de la turbina eólica, etapa 106.

Cuando se determina la distancia entre dos puntos conocidos de la pala 10, la distancia medida puede usarse en combinación con el perfil modal conocido de la pala de turbina eólica para determinar la posición de la localización del extremo de punta, y adicionalmente la forma de la pala flexionada.

En un aspecto de la invención, dado que la localización del extremo de raíz no se moverá sustancialmente durante la flexión de la pala, la localización del extremo de raíz puede tomarse como un punto fijo, contra el que puede  
55

compararse una matriz de formas de modos de pala conocidos, para ver qué forma de modo de pala satisface la distancia medida entre la localización del extremo de raíz fijo y la localización del extremo de punta flexionado. Una vez se determina la forma del modo de pala que satisface la distancia medida, puede calcularse a continuación la flexión de la pala.

- 5 Con referencia a la Fig. 6, se ilustra un aspecto del método de cálculo de la flexión basado en la distancia entre una localización de raíz y una localización de punta. En el método de la Fig. 6, la flexión se halla usando un cálculo por triangulación o trilateración simple.

Se define una localización del extremo de raíz en 70, que puede comprender un dispositivo de medición o comunicación proporcionado sobre un soporte o accesorio, localizado hacia el extremo de raíz 16 de una pala 10. Se define una localización del extremo de punta en 72, que puede comprender un dispositivo de medición o comunicación adecuado enlazado con un dispositivo del extremo de raíz, situada la localización del extremo de punta hacia el extremo de punta 14 de la pala 10. La distancia D1 entre las localizaciones de raíz y punta 70, 72 se supervisa de acuerdo con la etapa 104.

15 Se define una localización intermedia 74 entre dicha localización de raíz 70 y dicha localización de punta 72. La localización intermedia 74 se sitúa en un punto en el que, durante la excitación de una pala, la localización de la punta 72 se mueve sustancialmente a lo largo de un círculo teórico centrado aproximadamente en la localización intermedia 74. Se define la localización intermedia 74 en la que la distancia entre la localización de raíz 70 y la localización intermedia 74 (la distancia raíz-intermedia, D2) es conocida, y en la que la distancia entre la localización intermedia 74 y la localización de punta 72 (la distancia intermedia-punta, D3) es conocida.

20 Durante la excitación de la pala 10, la localización de la punta 72 puede localizarse en cualquiera de una serie de posibles localizaciones de excitación, de las que se indica una selección en la Fig. 6. Sin embargo, la distancia medida D1 entre la localización de raíz 70 y la localización de punta 72 permite que se calcule la posición real de la localización de la punta 72 basándose en un cálculo de trilateración, usando la distancia raíz-intermedia D2 conocida, la distancia intermedia-punta D3 conocida, y la distancia raíz-punta D1 medida. La posición real de la localización de la punta 72 puede usarse entonces para determinar la flexión de la pala 10 de la turbina eólica.

Se entenderá que en realizaciones en las que la localización de la punta supervisada se sitúa en el extremo de punta de una pala, la localización proporciona una indicación de la posición flexionada actual del extremo de punta de la pala.

30 Se entenderá adicionalmente que en realizaciones en las que la localización de la punta supervisada se localiza en el área del extremo de punta de la pala, pero separada del extremo de punta real, la localización de punta supervisada es indicativa de la posición flexionada de una localización conocida de la pala de turbina eólica. El conocimiento del intervalo de formas del modo excitado de la pala permite la localización del extremo de punta real a ser determinado, dado que el extremo de punta puede extrapolarse a partir de la posición flexionada de la localización de punta supervisada.

35 En una realización adicional de la invención, puede medirse la distancia desde la localización de raíz a primera y segunda localizaciones situadas hacia la punta de la pala 15. En esta realización, aunque la primera localización de la punta se sitúa próxima al extremo de punta real de la pala, el segundo extremo de punta se localiza preferentemente en el nodo de la segunda forma de modo de la pala 10 de turbina eólica. Mediante la medición de la distancia al nodo del segundo modo, es posible desacoplar el primer y segundo modos de pala entre sí. En consecuencia, el efecto de la segunda forma de modo puede aislarse de la primera forma de modo, de forma que puede mejorarse la precisión del cálculo de la flexión de la pala.

45 El perfil de flexión de la pala calculado en la etapa 106 puede usarse como una salida desde el método de la invención. En un aspecto adicional de la invención, el perfil de flexión de pala calculado en la etapa 106 se usa como una entrada a la etapa 108, en la que puede ajustarse el control y la operación de la turbina eólica, basándose en el perfil de flexión de la pala.

50 En un aspecto preferido, el perfil de flexión de la pala puede usarse para determinar la posibilidad de un golpe a la torre desde la pala 10 de la turbina eólica flexionada. En el caso de que sea probable el evento de un golpe a la torre, o que la posibilidad de un golpe a la torre exceda un cierto umbral de margen de seguridad, puede ajustarse la operación de la turbina, por ejemplo cambiando el paso de la pala 10 de la turbina eólica de modo que la punta 14 de la pala se mueva separándose de la torre 4, y/o mediante la realización de un frenado de la turbina.

En una mejora de la invención, cierta información tal como la amplitud del modo de pala, la forma del modo de pala excitado, y/o la localización de la punta de la pala pueden precalcularse para al menos algunos valores o distancias medidas entre dos localizaciones conocidas en una pala de turbina eólica. Los valores precalculados pueden almacenarse en un dispositivo de almacenamiento adecuado, por ejemplo un medio de almacenamiento legible por

ordenador, por ejemplo una tabla de búsqueda, que pueda ser parte de o enlazada comunicativamente con un controlador adecuado. Los datos pueden estar entonces accesibles durante la operación de una pala de turbina eólica. Mediante el precálculo de la amplitud del modo, la forma del modo y/o la localización de la punta para al menos algunas distancias medidas, puede incrementarse la velocidad de procesamiento del método, conduciendo a una mayor capacidad de respuesta del sistema.

En un aspecto adicional de la invención, el sistema de supervisión de flexión de la pala puede disponerse para recalibrar el sistema de supervisión de la flexión a través del recálculo de las distancias entre las localizaciones de raíz y punta. Dicho recalibrado puede realizarse a través del uso de una pluralidad de localizaciones de raíz y/o punta que tengan dispositivos adecuados para el cálculo de la distancia y/o posición, por ejemplo dispositivos de comunicación inalámbricos. El recalibrado de las distancias entre localizaciones puede establecerse usando cálculos de triangulación o trilateración adecuados entre los dispositivos en diferentes localizaciones. En un aspecto adicional de la invención, dicha calibración puede realizarse cuando la pala de la turbina eólica se dispone en una posición de variación de flexión mínima, por ejemplo cuando la pala de la turbina eólica se dispone en una alineación sustancialmente vertical, apuntando hacia el nivel de tierra para la turbina.

El uso de una pala que tenga dicho sistema y método para el cálculo de la flexión de la pala basado en perfiles modales de pala conocidos permite un cálculo más rápido, más eficiente y más preciso de la flexión de la pala, lo que puede conducir a un control mejorado de la operación de la turbina.

La invención no está limitada a las realizaciones descritas en el presente documento, y puede modificarse o adaptarse sin apartarse del alcance de la presente invención.

20

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de cálculo de un perfil de flexión de pala de una pala de turbina eólica que tenga un sistema de supervisión de flexión de la pala, comprendiendo el método las etapas de:

proporcionar una pala de turbina eólica que tenga un perfil modal conocido;

5 medir la distancia entre al menos una localización raíz hacia un extremo de raíz de la pala de turbina eólica y al menos una localización de punta hacia un extremo de punta de la pala de turbina eólica; caracterizado por el cálculo de un perfil de flexión de la pala basándose en la distancia medida entre dichas localizaciones de raíz y punta y dicho perfil modal conocido.

10 2. El método de la reivindicación 1, en el que dicho perfil de flexión de pala se usa como una entrada a un sistema de seguridad de la turbina eólica, en el que dicho perfil de flexión de la pala se usa para calcular si la flexión de dicha pala de turbina eólica excede un umbral de seguridad para un golpe a la torre.

3. El método de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el método comprende la etapa de proporcionar un enlace de comunicación inalámbrico entre dicha al menos una localización de raíz y dicha al menos una localización de punta, preferentemente un enlace inalámbrico de comunicación por radio.

15 4. El método de la reivindicación 3, en el que el método comprende la etapa de proporcionar primera y segunda localizaciones de raíz, y/o primera y segunda localizaciones de punta, en el que dicha etapa de cálculo de un perfil de flexión de la pala se basa en una distancia medida entre la combinación de localización de raíz y localización de punta particular que tenga la mejor intensidad de señal, calidad de señal, y/o línea de visión (RF).

20 5. El método de la reivindicación 4, en el que el método comprende la etapa de calibrar un sistema de supervisión de la flexión de la pala, en el que dicha calibración comprende la realización de una operación de triangulación o trilateración entre dicha primera y segunda localizaciones de raíz y dicha al menos una localización de punta.

25 6. El método de cualquiera de las reivindicaciones precedentes en el que el método comprende proporcionar al menos primera y segunda localizaciones de punta, en el que una primera localización se dispone próxima a un extremo de punta de una pala de turbina eólica y una segunda localización de punta se localiza en el nodo de una segunda forma de modo de la pala de turbina eólica.

7. El método de la reivindicación 6, en el que el método comprende las etapas de:

medir una primera distancia desde dicha al menos una localización de raíz a dicha primera localización de punta;

30 medir una segunda distancia desde dicha al menos una localización de raíz a dicha segunda localización de punta; y calcular un perfil de flexión de la pala basándose en dicha primera y segunda distancias y dicho perfil modal conocido.

8. El método de cualquier reivindicación precedente, en el que el método comprende las etapas de:

medir una distancia entre dos localizaciones conocidas de una pala de turbina eólica;

calcular una amplitud del modo de la pala basándose en dicha distancia medida; y

35 determinar la forma de modo de pala excitado de la pala de turbina eólica usando dicha amplitud de modo de pala calculada.

9. El método de cualquier reivindicación precedente, en el que el método comprende la etapa de calcular una posición de una localización de punta conocida sobre una pala de turbina eólica cuando dicha pala de turbina eólica se flexiona o excita, en el que el método comprende las etapas de:

definir una localización de raíz hacia un extremo de raíz de la pala de turbina eólica;

40 definir una localización de punta hacia un extremo de punta de la pala de turbina eólica; y

definir una localización intermedia entre dicha localización de raíz y dicha localización de punta, en el que dicha localización intermedia se posiciona en un punto en el que, durante la excitación de la pala, dicha localización de punta se mueve sustancialmente a lo largo de un círculo teórico centrado aproximadamente en dicha localización intermedia,

en el que la distancia entre dicha localización de raíz y dicha localización intermedia es conocida (la distancia raíz-intermedia), y en el que la distancia entre dicha localización intermedia y dicha localización de punta es conocida (la distancia intermedia-punta), comprendiendo el método adicionalmente las etapas de:

5 medir la distancia entre dicha localización de raíz y dicha localización de punta durante la excitación de la pala de turbina eólica; y

calcular la posición de dicha localización de punta durante la excitación de la pala de turbina eólica basándose en un cálculo de trilateración, usando la distancia raíz-intermedia conocida, la distancia intermedia-punta conocida, y la distancia raíz-punta medida.

10 10. Un método para el control de una turbina eólica, que comprende el control de la turbina eólica basándose en un perfil de flexión de la pala calculado de acuerdo con el método tal como se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones 1-9, preferentemente en el que la etapa de control comprende al menos una de las siguientes: ajuste de un ángulo de paso de la pala, ajuste de un ángulo de orientación de la turbina, ajuste de una capacidad del generador o nivel de salida, realizando una parada de emergencia de la turbina eólica.

15 11. Un sistema de supervisión de flexión de la pala para una pala de turbina eólica dispuesto para implementar las etapas del método tal como se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones 1-9.

12. Un sistema de supervisión de flexión de la pala para una pala de turbina eólica, comprendiendo el sistema:

al menos un elemento de punta a ser dispuesto en una localización hacia el extremo de punta de una pala de turbina eólica;

20 al menos un elemento de raíz a ser dispuesto en una localización hacia el extremo de raíz de una pala de turbina eólica;

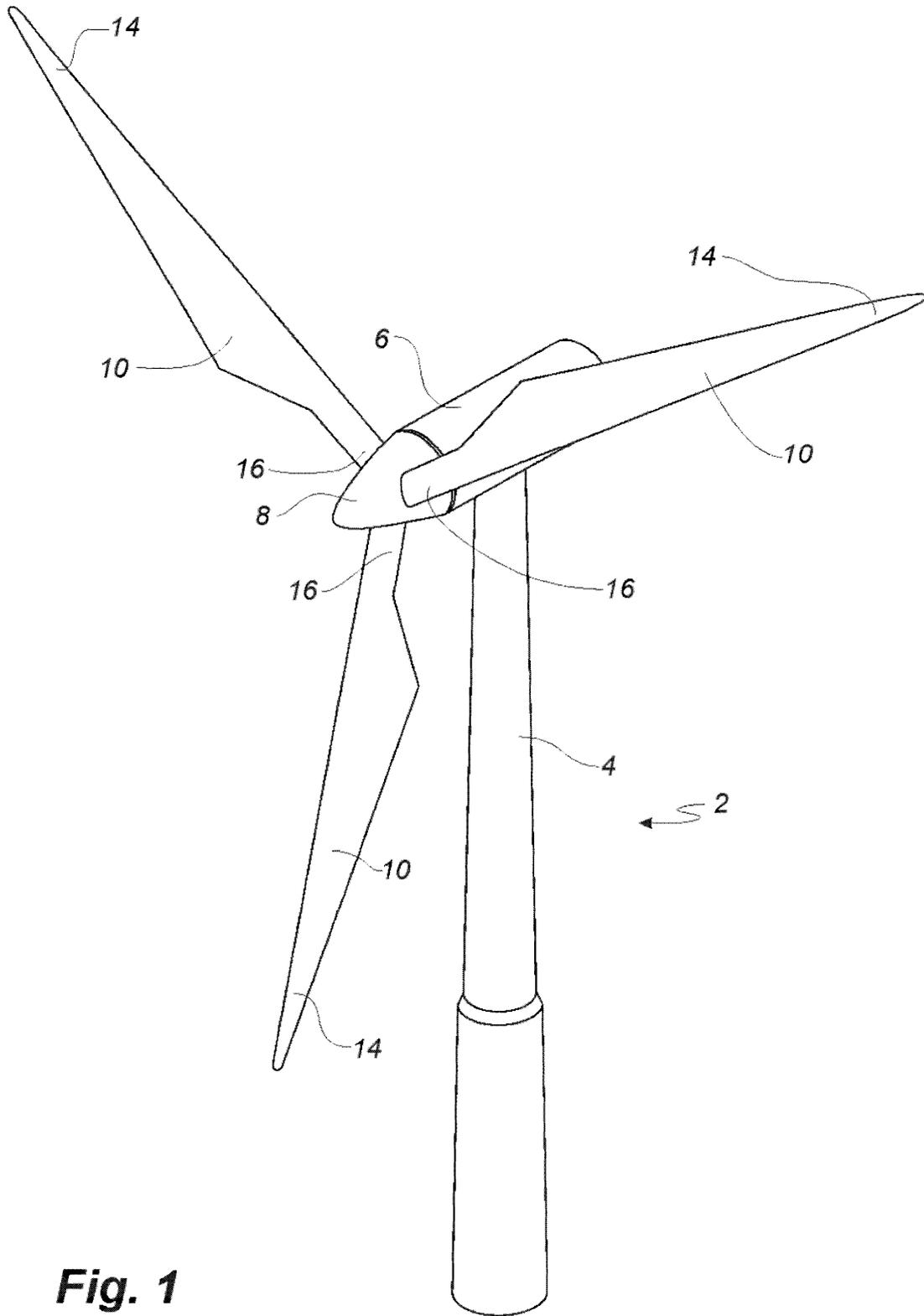
un sistema de medición de distancia dispuesto para medir una distancia entre dicho al menos un elemento de punta y dicho al menos un elemento de raíz;

caracterizado por

25 un controlador dispuesto para recibir un perfil modal para una pala de turbina eólica, operativo el controlador para calcular un perfil de flexión de la pala basándose en la distancia medida entre dichas localizaciones de raíz y punta y dicho perfil modal.

13. Un controlador de pala de turbina eólica operativo para controlar la operación de una turbina eólica basándose en un perfil de flexión de pala calculado, y/o en una señal de control generada por el sistema de supervisión de flexión de la pala de la reivindicación 11 o la reivindicación 12.

30 14. Una turbina eólica que comprende al menos una pala de turbina eólica que tiene un sistema de supervisión de flexión de la pala de acuerdo con la reivindicación 11 o la reivindicación 12, y/o un controlador de pala de turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 13.



**Fig. 1**

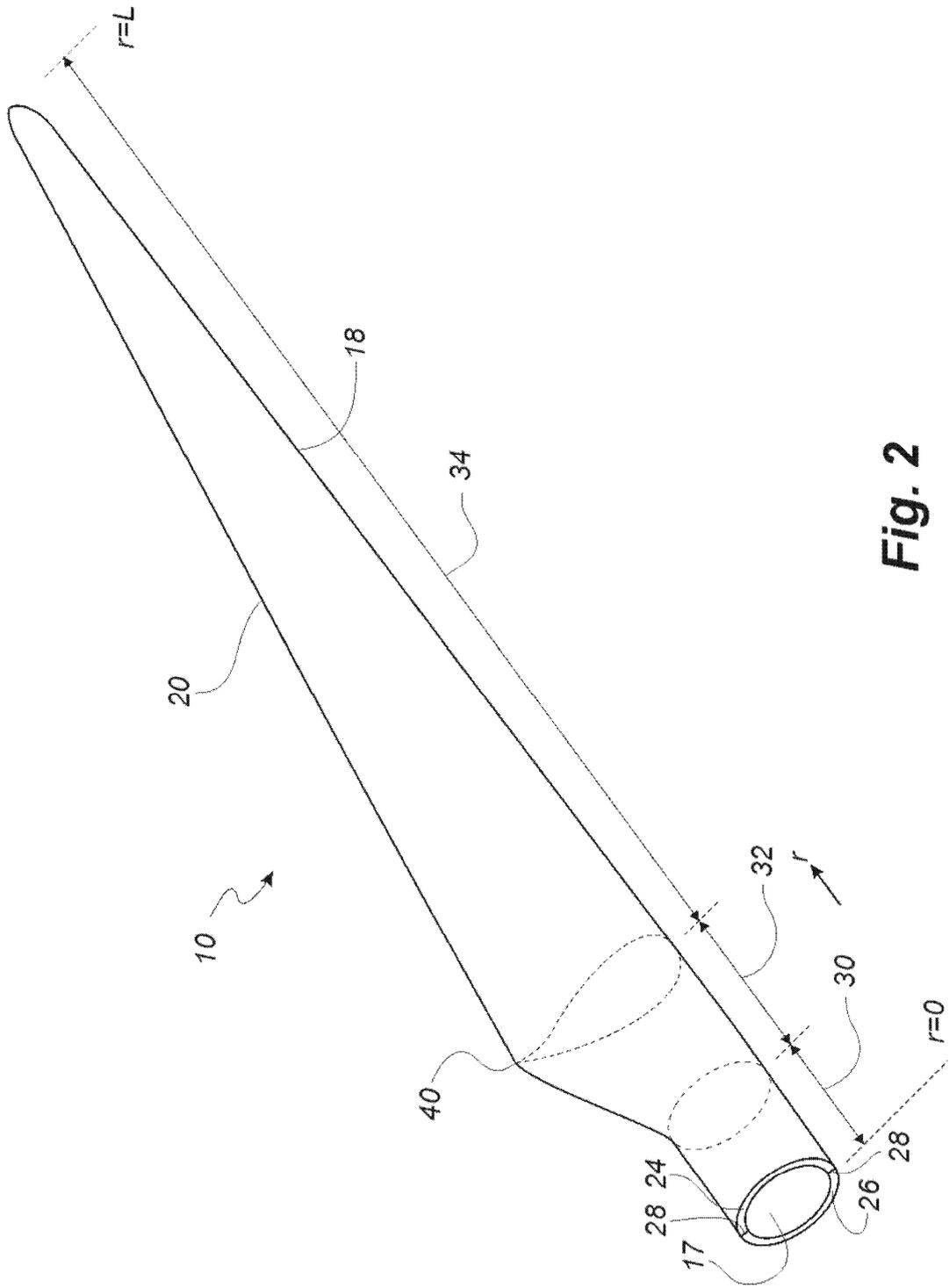
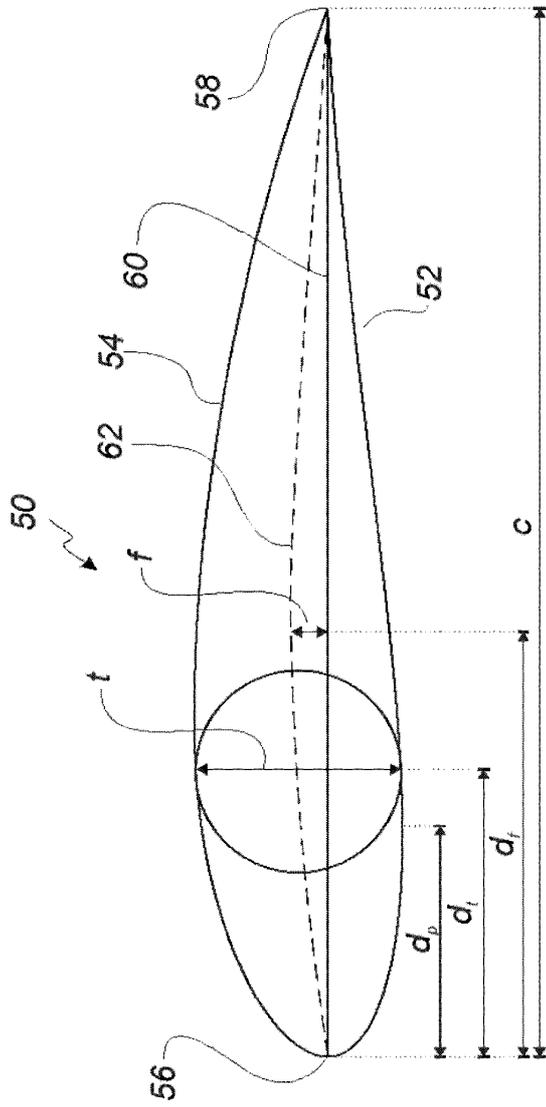
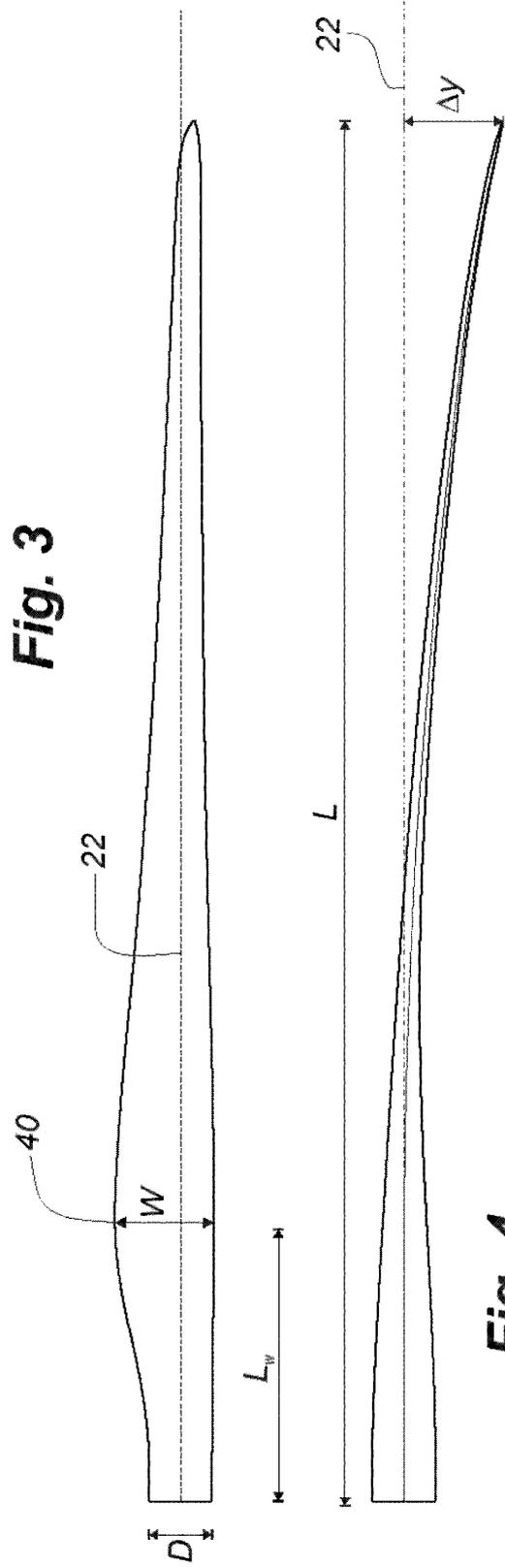


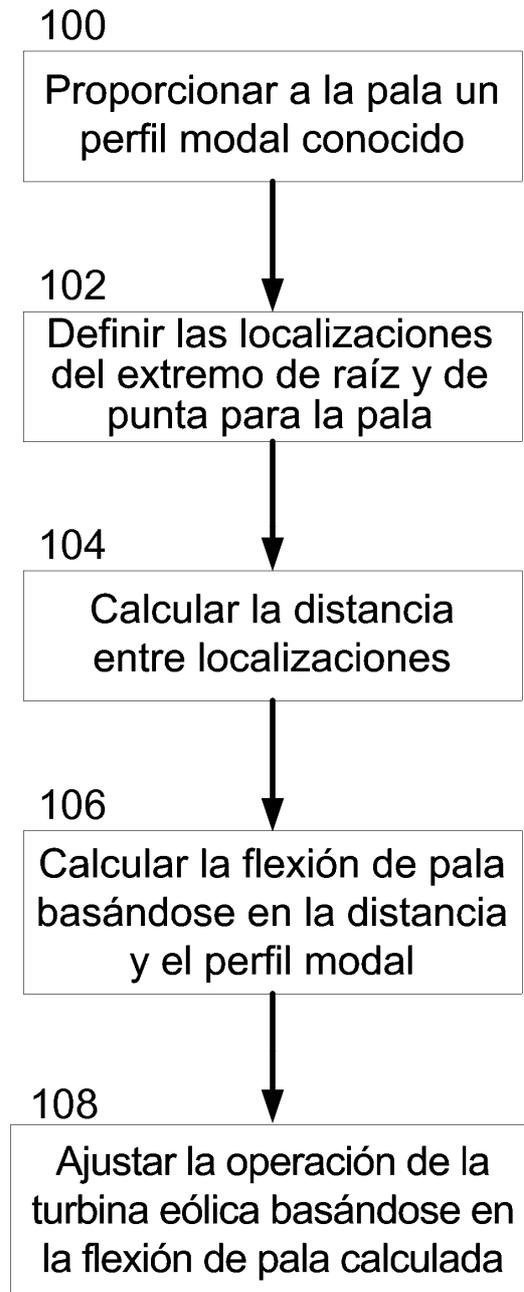
Fig. 2



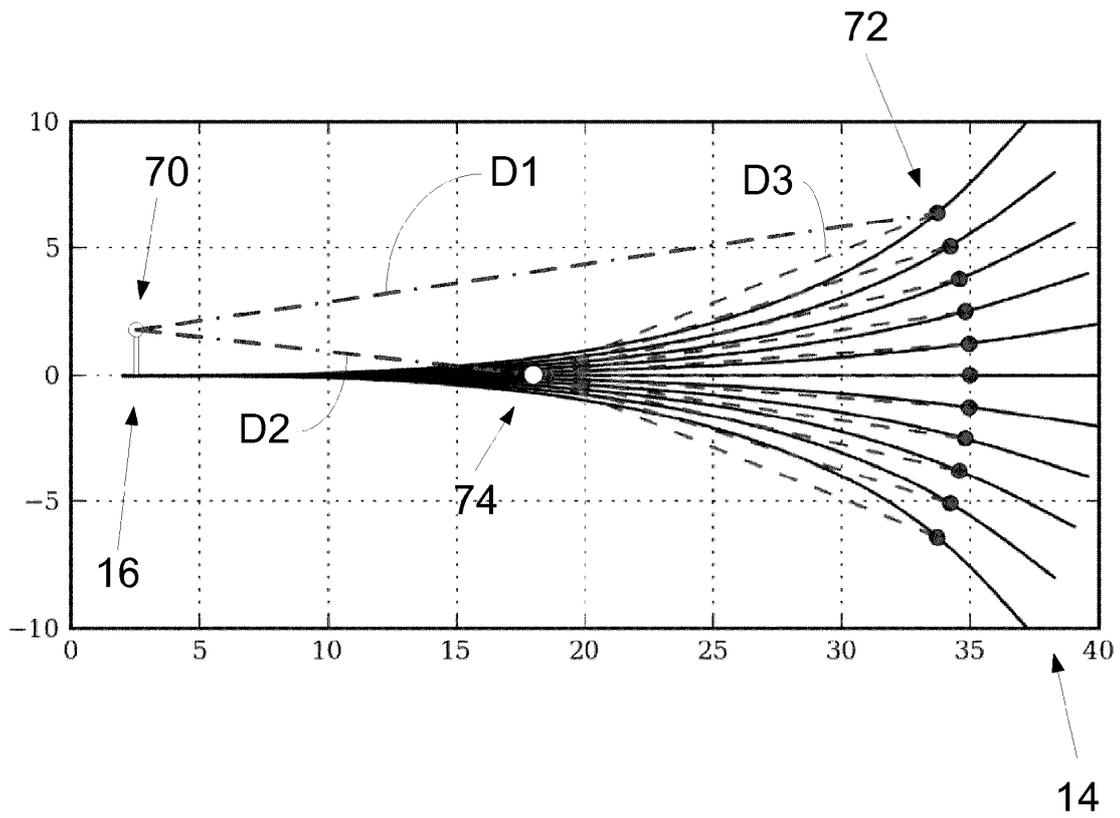
**Fig. 3**



**Fig. 4**



**Fig. 5**



**Fig. 6**