

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 630 061**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.08.2013 PCT/EP2013/067009**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.02.2014 WO14027032**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.08.2013 E 13748331 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.03.2017 EP 2885531**

54 Título: **Sistema de monitorización de deflexión de palas**

30 Prioridad:

17.08.2012 EP 12180776

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

17.08.2017

73 Titular/es:

LM WP PATENT HOLDING A/S (100.0%)

Jupitervej 6

6000 Kolding, DK

72 Inventor/es:

BYSKOV, CLAUS;

BÆK, PETER;

KLITGAARD, MICHAEL;

SKOVBY, CASPER y

FUGLSANG, LARS

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 630 061 T3

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

DESCRIPCIÓN

Sistema de monitorización de deflexión de palas

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a un sistema y a un método para el control de la deflexión de una pala de turbina eólica.

Antecedentes de la invención

10 Los modernos diseños de turbinas eólicas buscan incorporar varios sistemas de monitorización de palas, con el fin de proporcionar un funcionamiento confiable y controlado de la turbina eólica. Tales sistemas de monitorización pueden incluir sistemas de monitorización de deflexión de pala, que se utilizan para proporcionar una indicación de la deflexión o flexión de la pala de la turbina eólica durante el funcionamiento de la turbina. Esta información se puede usar para monitorizar la posibilidad de un golpe futuro de la torre por las palas de las turbinas eólicas, y para llevar a cabo las acciones del controlador apropiadas, por ejemplo, el lanzamiento de la pala o el frenado de la turbina para evitar un tal golpe de la torre previsto.

15 Un ejemplo de dicho sistema de control de deflexión se proporciona en la patente US 7.883.316, que describe un sistema de monitorización de deflexión que utiliza una red de comunicación inalámbrica, operable para detectar la posición de varios puntos a lo largo de la longitud de la pala y para determinar el curvado de la pala a partir de esta información.

El documento US 2010/021298 divulga un sistema de control de deflexión inalámbrico que comprende un dispositivo de comunicación de la góndola.

20 El documento WO 2009/143848 divulga un sistema de monitorización óptico.

25 Sin embargo, se ha encontrado que tales sistemas de monitorización inalámbricos son vulnerables a diversos factores operacionales que actúan para reducir la eficacia del sistema de monitorización, por ejemplo, interferencia por efectos de reflexión o multitrayecto, atenuación de señal causada por el paso a través de capas de diferentes materiales, etc. Tradicionalmente, dichos sistemas de monitorización están montados internamente en la estructura de la pala de turbinas eólicas y, por consiguiente, son susceptibles a interferencias considerables debido a la reflexión de la señal procedente de los laminados de pala internos y los largueros de pala.

Un objeto de la invención es proporcionar un sistema de monitorización de deflexión de pala mejorado que sea menos susceptible a los factores anteriormente descritos.

Sumario de la invención

30 Por consiguiente, se proporciona una pala de turbina eólica que comprende un cuerpo de perfil de perfil aerodinámico que tiene un lado de presión y un lado de succión, y un borde delantero y un borde de salida con una longitud de cuerda que se extiende entre ellos, la pala de turbina eólica comprendiendo, además:

al menos un dispositivo de comunicación de punta situado hacia dicho extremo de punta,

35 al menos un dispositivo de comunicación de raíz situado hacia dicho extremo de raíz, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz en comunicación inalámbrica con dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta a través de un trayecto de comunicación inalámbrica, para monitorizar la distancia entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para determinar un movimiento de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta con respecto a dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz indicativo de una deflexión de la pala, donde

40 dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz se proporciona en al menos un soporte que sobresale de una superficie externa de dicha pala de turbina eólica en dicho extremo de raíz, en el que dicho dispositivo de comunicación de raíz está separado de la superficie externa de dicha pala para minimizar la pérdida de trayecto en la comunicación de trayecto entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz.

45 A través de la monitorización de los cambios en la distancia entre los dispositivos de comunicaciones proporcionados hacia los extremos de la raíz y de la punta de la pala, es relativamente fácil determinar la deflexión de la pala de la turbina eólica. Esta información se puede usar entonces para proporcionar un control mejorado de la

turbina eólica, por ejemplo, en el caso de que una deflexión de la pala pueda conducir a un golpe de la torre, se puede realizar el cabeceo de emergencia de la pala de la turbina eólica.

5 Mediante la colocación del dispositivo de comunicación de raíz en el exterior de la pala y, además, separando la trayectoria de comunicación de la superficie de la pala, la trayectoria de comunicación entre los dos dispositivos de comunicación se ve menos afectada por la pérdida de trayecto debido a la reflexión, trayectorias múltiples, atenuación de señal o absorción de señal. Esto da como resultado una calidad de señal mejorada para el enlace de comunicación entre los dispositivos y, en consecuencia, proporciona un sistema de detección de deflexión de pala mejorado. Además, el posicionamiento de los dispositivos de raíz y de punta en la propia pala asegura que la trayectoria de comunicación entre los dispositivos se mantenga, independientemente del paso o rotación de la pala, 10 o de los movimientos de guiñada de la turbina. Al proporcionar los dispositivos en el mismo sistema de coordenadas de cabeceo, esto permite una simplificación considerable de los cálculos requeridos para el funcionamiento del sistema, cuando se compara con sistemas alternativos que tienen un primer dispositivo montado en una pala y un segundo dispositivo montado en un cubo del rotor o a una góndola de turbina.

15 Preferentemente, dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de dicha pala de turbina eólica, estando situado dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz en un extremo distal de dicho al menos un soporte, teniendo la pala de turbina eólica una forma de deflexión máxima característica para la pala de turbina eólica, en la que la longitud por la que dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de la pala de turbina eólica se selecciona sobre la base de dicha forma de deformación máxima característica, de tal manera que la pérdida de trayectoria del trayecto de comunicación entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de 20 punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz está por debajo de un nivel de pérdida de trayectoria aceptable predeterminado.

25 Como cualquier pala de turbina eólica tendrá un nivel de deflexión máximo para el cual la pala está certificada, esto puede ser visto como un peor escenario de deflexión. Por consiguiente, al espaciar el dispositivo de comunicación de raíz a cierta distancia de la superficie de la pala, se puede asegurar un nivel de comunicación de señal aceptable para todos los niveles de deflexión previstos de la pala.

30 Adicionalmente o alternativamente, dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de dicha pala de turbina eólica, estando dispuesto dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz en un extremo distal de dicho al menos un soporte, en el que dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta se proporciona en la superficie externa de la pala de turbina eólica, teniendo la pala de turbina eólica un rango de formas de deflexión certificadas, en el que

la longitud por la que dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de la pala de turbina eólica se selecciona de tal manera que se mantiene una trayectoria de comunicación de línea de visión entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para dicho intervalo de formas de deflexión certificadas de dicha pala.

35 Proporcionando el dispositivo de comunicación de raíz en un soporte relativamente largo, puede mantenerse una conexión de línea de visión entre los dispositivos de punta y de raíz para todas las formas de deflexión predichas de la pala de turbina eólica, dando como resultado una calidad de señal excelente para el trayecto de comunicación entre los dispositivos.

40 Se entenderá sin embargo que el dispositivo de comunicación de punta puede estar provisto internamente del cuerpo de pala, por ejemplo, en un rayo de pala interno, una banda o un larguero.

45 Alternativamente, dicho dispositivo de comunicación de punta puede estar previsto externamente al cuerpo de pala. Por ejemplo, el dispositivo de comunicación de punta puede estar montado en una superficie externa de la pala o estar situado dentro de una ranura, canal o abertura definida en la superficie externa de la pala, de manera que al menos una parte de dicho dispositivo de comunicación de punta esté expuesta al exterior de la pala. Al situar el dispositivo de comunicación de punta exterior del cuerpo de pala, se conserva la calidad de la intensidad de señal entre los dispositivos de comunicación y la forma de onda tiene distorsión reducida, ya que la señal no tiene que pasar a través de la pared del cuerpo de pala entre los dispositivos. Para un dispositivo de punta montado externamente, preferentemente el dispositivo está configurado para reducir el ruido acústico, y/o la pala comprende además características de reducción de ruido, para disminuir el efecto de cualquier ruido operacional producido por 50 el dispositivo montado externamente.

Preferentemente, el sistema está configurado de tal manera que la señal de comunicación se propaga a lo largo del borde delantero o de salida de la pala, y la curvatura a la pala de la pala da lugar a un cambio máximo en el tiempo de propagación de la señal.

Preferentemente, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz está situado hacia el borde delantero o de

arrastre de dicha pala de turbina eólica. Preferentemente, dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta está situado hacia el borde de ataque o borde de salida de dicha pala de turbina de viento. En un aspecto de la invención, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz y dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta están situados hacia el mismo lado de dicha pala de turbina eólica.

5 Al situar los dispositivos de comunicación en o cerca de los bordes delanteros o de salida de la pala, esto proporciona una calidad de señal mejorada de la trayectoria de comunicación entre los dispositivos de raíz y de punta. En primer lugar, debido a la curvatura relativamente alta de la superficie externa de la pala en los bordes delantero y trasero, cualquier reflejo de señal de esta superficie curvada se dispersará sobre un área relativamente amplia, en comparación con reflejos similares desde una superficie relativamente plana. Como resultado, se reducirá cualquier interferencia de reflexión en la trayectoria de comunicación entre los dispositivos. En segundo lugar, debido a la deflexión marginal relativamente pequeña de la pala de la turbina eólica cuando se compara con la deflexión de la pala a modo de aleta, la altura del soporte se puede mantener relativamente pequeña para mantener una conexión de línea de mira entre los dispositivos o al menos una trayectoria de comunicación que tiene una trayectoria de pérdida baja.

15 Además, como el espesor del laminado de pala en el borde delantero o de salida de la pala es relativamente delgado cuando se compara con el grosor en otras secciones de la pala, por ejemplo, donde el laminado es más grueso por razones estructurales, si la trayectoria de comunicación entre los dispositivos de raíz y de punta debe pasar a través de una parte del cuerpo de pala, la calidad de la señal del trayecto de comunicación es menos afectada por tener que pasar a través de una sección laminada relativamente delgada.

20 Se comprenderá que los dispositivos pueden estar previstos en los bordes delantero o de salida de la pala o adyacentes al borde delantero o de salida.

Preferentemente, la pala de turbina eólica comprende un primer dispositivo de comunicación de raíz dispuesto en un primer soporte y un segundo dispositivo de comunicación de raíz dispuesto en un segundo soporte, proporcionando los primeros y segundos dispositivos de comunicación de raíz hacia el borde delantero o de salida en el que dicho primer dispositivo de comunicación de raíz situado en el lado de presión de dicho borde delantero o de arrastre y dicho segundo dispositivo de comunicación de raíz está situado en el lado de aspiración de dicho borde delantero o de arrastre.

Colocando los dispositivos de raíz a cada lado del borde delantero o de salida, los dispositivos de raíz se pueden proporcionar en posiciones definibles que permiten la trilateración y/o la distancia de triangulación o las mediciones de posición.

Preferentemente, la pala de turbina eólica comprende un primer dispositivo de comunicación de punta situado en una primera posición a lo largo de la longitud de la pala de turbina eólica hacia el extremo de punta de la pala y un segundo dispositivo de comunicación de punta situado en una segunda posición a lo largo de la pala de la turbina eólica hacia el extremo de punta de la pala, en el que dicha primera posición está separada de dicha segunda posición, estando situada dicha segunda posición entre dicha primera posición y dicho extremo de punta.

El espaciado de los dos dispositivos de punta a lo largo de la pala permite calcular la deformación de la pala para dos puntos distintos a lo largo de la pala. En consecuencia, puede proporcionarse una estimación más precisa de la deflexión de la pala, y el sistema además permite la medición de los momentos de la pala y la monitorización de las formas del modo de pala. Esto puede resultar en un control preciso de la excitación del modo de pala, mediante el control apropiado de los dispositivos activos de la pala, accionadores, etc.

Preferentemente, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz es operable para determinar la ubicación de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta usando trilateración. Adicionalmente o alternativamente, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz es operable para determinar la ubicación de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta usando triangulación.

45 Preferentemente, dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz son dispositivos de seguimiento y/o comunicación de localización de banda ultralarga (UWB), y en el que dicha trayectoria de comunicación es una trayectoria de comunicación de señal UWB.

La comunicación UWB permite realizar una medición de distancia o distancia entre un transmisor y un dispositivo receptor, en una aplicación de baja potencia, minimizando los efectos de interferencias externas.

50 Se entenderá que dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y/o dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz se seleccionan de uno de los siguientes: un receptor, un transmisor, un circuito receptor-transmisor o un transceptor. Se comprenderá además que el al menos un dispositivo de comunicación de punta puede comprender una antena proporcionada hacia dicho extremo de punta, estando acoplada la antena a un

receptor, transmisor, receptor o transmisor-receptor proporcionado en una ubicación separada, por ejemplo, hacia el extremo de la raíz de la pala.

5 Tal configuración permitirá que la electrónica relativamente compleja del receptor, transmisor, receptor-transmisor o circuito transceptor se posicione en una posición relativamente fácil de servir, por ejemplo, un extremo de la raíz de la pala. Una antena puede estar dispuesta en un lugar adyacente al extremo de la punta, y acoplada a la electrónica a través de un cable de señal u otra conexión adecuada. Se puede proporcionar un cable de este tipo acoplado a componentes de pala internos, por ejemplo, un cable conductor de rayo interno.

10 Preferentemente, la pala de turbina eólica comprende al menos un componente de procesador acoplado comunicativamente a al menos uno de dichos dispositivos de comunicación, en el que dicho al menos un componente de procesador está dispuesto en una carcasa de controlador situada en o adyacente al extremo de raíz de la pala de turbina eólica, dicho al menos un componente de procesador se selecciona de al menos uno de los siguientes: un receptor, un transmisor, un circuito receptor-transmisor, un transceptor, un controlador.

15 En esta realización, la electrónica activa relativamente sensible usada para transmitir, recibir y/o al menos parcialmente procesar las señales de comunicación inalámbricas puede alojarse en un entorno seguro, el cual puede ser sellado para evitar la entrada de humedad y/o protegido eléctricamente a impedir que interferencias electromagnéticas externas y/o rayos afecten a los componentes contenidos. Por ejemplo, dicha carcasa puede estar acoplada a un sistema de protección contra rayos de una turbina eólica, para proporcionar una trayectoria a tierra para cualquier ataque de rayo en la carcasa. Una carcasa de controlador de este tipo se puede colocar en consecuencia en una posición relativamente fácil de servir, para permitir el servicio y/o la reparación de componentes cuando sea necesario, por ejemplo, en el extremo de la raíz de una pala, o en un cubo de turbina de viento o góndola.

20 Preferentemente, la pala de turbina eólica comprende al menos un módulo de pala acoplado a dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta, en el que dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz son operables para transmitir datos a o desde dicho al menos un módulo de pala que utiliza dicha trayectoria de comunicación entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz.

25 En este caso, la trayectoria de comunicación entre los dispositivos de raíz y de punta puede realizar el doble propósito de proporcionar una medición de rango o distancia, es decir, para determinar la deflexión de pala, así como para la transmisión de datos entre los extremos de raíz y extremo de la pala. Se entenderá que la señal de cálculo de distancia transmitida a través de la vía de comunicación puede ser modulada con dichos datos.

30 Se entenderá que dicho al menos un módulo de pala puede comprender un dispositivo de sensor de pala, por ejemplo, un acelerómetro, un sensor de deformación, un sensor de vibración, etc., en el que dicho dispositivo de comunicación de punta es operable para transmitir datos de sensor desde dicho dispositivo sensor de pala a un controlador a través de dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz.

35 Adicionalmente o alternativamente, dicho al menos un módulo de pala puede comprender un dispositivo de elevación activo de pala, por ejemplo, un módulo de superficie piezoeléctrica, un alerón, una lengüeta, un dispositivo de inyección de fluido, etc., en el que dicho dispositivo de comunicación de raíz es operable para transmitir una señal de control a dicho dispositivo de elevación activa de la pala a través de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta.

40 En una realización, la pala de turbina eólica comprende al menos un acelerómetro acoplado con dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta, dicho al menos un acelerómetro operable para corregir la deriva del sensor.

Adicionalmente o alternativamente, la pala de turbina eólica comprende además un controlador, operando dicho controlador para controlar una señal transmitida a lo largo de dicha trayectoria de comunicación entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta, donde

45 dicho controlador se puede operar adicionalmente para ajustar la ganancia de señal de dicha señal basándose en al menos uno de los siguientes: un nivel de deflexión de pala medido, un nivel de deflexión de pala previsto, un nivel de fuerza de señal de una señal recibida a través de dicho recorrido de comunicación.

50 Este control adaptativo del enlace de comunicaciones entre los dispositivos de raíz y de punta proporciona un funcionamiento mejorado del sistema y unos requisitos de potencia operativa reducidos debido a niveles de señal optimizados.

El controlador puede actuar para reducir la ganancia de señal cuando se sabe que el nivel de deflexión de la pala proporciona interferencia reducida a la trayectoria de comunicación, por ejemplo, cuando la pala permite una

- 5 trayectoria clara de la línea-o-vista entre los dispositivos de la raíz y de la extremidad. Además, a medida que se conocen las características de desviación de la pala, es posible determinar el efecto que puede tener una deflexión particular de la pala sobre la calidad de la señal en la trayectoria de comunicación. Por consiguiente, el controlador puede actuar para ajustar la ganancia de señal basándose en las características de interferencia y/o absorción de la pala desviada.
- Puesto que la deflexión de la pala se puede controlar a lo largo del tiempo, puede ser posible predecir la probable deflexión futura de la pala. Por consiguiente, el controlador puede actuar para ajustar la ganancia de señal basándose en esta deflexión predicha, para asegurar una calidad de señal suficiente para períodos de tiempo futuros.
- 10 Finalmente, el controlador puede actuar para aumentar o reducir la ganancia de señal basándose en las condiciones de la señal de corriente a lo largo de la trayectoria de comunicación, proporcionando un rendimiento mejorado.
- Preferentemente, la pala de turbina eólica comprende además un material absorbente de ondas de radio dispuesto sobre al menos una sección de los componentes de las palas de turbina eólicas.
- 15 El material absorbente de ondas de radio o material absorbente de radar actúa para absorber ondas de radio, reduciendo de este modo el efecto de las reflexiones de trayectos múltiples y de señales en la trayectoria de comunicación entre los dispositivos de raíz y de punta.
- Adicional o alternativamente, la superficie de al menos una sección de los componentes de las palas de las turbinas eólicas puede ser tratada superficialmente para mejorar el rendimiento del sistema, por ejemplo, una parte de la superficie puede ser rugosa a través de un proceso de molienda o abrasivo, de tal manera que cualquier reflejo de señal desde dicha superficie se refleja o se dispersa a través de una distribución aleatoria de direcciones.
- 20 Preferentemente, el material absorbente de ondas de radio se proporciona sobre las secciones de la pala de turbina eólica situadas adyacentes o sobre la trayectoria de comunicación entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta.
- 25 El material absorbente puede proporcionarse en los lugares que proporcionan el mayor beneficio para la reducción de la interferencia de la señal en la trayectoria de comunicación, por ejemplo, A lo largo de una porción del borde de ataque de la pala, a lo largo de una sección de las bandas de pala interior, etc.
- Adicionalmente, se proporciona una turbina eólica que tiene al menos una pala de turbina eólica como se ha descrito anteriormente.
- 30 Adicionalmente, se proporciona una turbina eólica que tiene al menos una pala de turbina eólica como se ha descrito anteriormente.
- Preferentemente, la turbina eólica comprende un sistema de control de paso que puede accionarse para ajustar el paso de al menos una pala de turbina eólica de dicha turbina eólica, en el que la entrada a dicho sistema de control de paso está al menos parcialmente basada en el movimiento determinado de dicha al menos un dispositivo de comunicación de punta con respecto a dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz indicativo de una deflexión de pala.
- 35 Se comprenderá que la turbina eólica puede estar provista de un sistema de seguridad suplementario, que puede operar para asegurar la seguridad de la turbina y evitar golpes en la torre, etc., en caso de fallo del sistema de medición de deflexión de pala.
- 40 Además, se proporciona un método para controlar la deflexión de una pala de turbina eólica, teniendo la pala de turbina eólica un lado de presión y un lado de succión y un borde delantero y un borde de salida con una longitud de cuerda que se extiende entre ellos, teniendo la pala un extremo de punta y un extremo de raíz, comprendiendo el método las etapas de:
- proporcionar al menos un dispositivo de comunicación de punta situado hacia el extremo de punta de una pala de turbina eólica,
- 45 proporcionar al menos un dispositivo de comunicación de raíz situado hacia el extremo de raíz de dicha pala de turbina eólica, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz en comunicación inalámbrica con dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta a través de una trayectoria de comunicación inalámbrica,
- transmitir una señal entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo

- de comunicación de raíz a lo largo de dicho trayecto de comunicación inalámbrico,
- calcular una medida de distancia entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz basado en dicha señal, y
- 5 determinar un valor de deflexión de pala actual basado en dicha medición de distancia, en el que el método comprende además la etapa de
- ajustar un nivel de ganancia de señal de dicha señal basado en al menos uno de los siguientes: el valor actual de deflexión de pala, un valor de deflexión previsto de pala basado al menos en parte en dicho valor de deflexión de pala de corriente o un nivel de fuerza de señal de una señal recibida a través de dicha trayectoria de comunicación.
- 10 El uso de tal método de control puede proporcionar un rendimiento mejorado sobre los sistemas existentes, ya que el consumo de energía del sistema de comunicación inalámbrico puede optimizarse para un funcionamiento más eficiente y que puede basarse en el conocimiento previo de las características estructurales de la pala de turbina eólica en cuestión.
- Se proporciona además un método para controlar una turbina eólica que tiene al menos una pala de turbina eólica, comprendiendo el método las etapas de:
- 15 monitorizar la deflexión de al menos una pala de turbina eólica como se ha descrito anteriormente; y
- al menos una pala de turbina eólica para controlar la deflexión de dicha al menos una pala de turbina eólica.
- Se proporciona además un método para diseñar un sistema de monitorización de palas como se ha descrito anteriormente para su uso en una pala de turbina eólica, comprendiendo el método las etapas de:
- 20 proporcionar una pala de turbina eólica que comprende un cuerpo de perfil de perfil aerodinámico que tiene un lado de presión y un lado de succión y un borde delantero y un borde de salida con una longitud de cuerda que se extiende entre ellos, teniendo la pala un extremo de extremo y un perfil de deflexión definido,
- proporcionar al menos un dispositivo de comunicación de punta situado hacia dicho extremo de punta,
- proporcionar al menos un dispositivo de comunicación de raíz situado hacia dicho extremo de raíz, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz en comunicación inalámbrica con dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta a través de un trayecto de comunicación inalámbrica, para monitorizar la distancia entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para determinar un movimiento de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta con respecto a dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz indicativo de una deflexión de la pala,
- 25 proporcionar al menos un soporte que sobresale de una superficie externa de dicha pala de turbina eólica en dicho extremo de raíz, en el que dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz se proporciona en dicho al menos un soporte y
- calcular un nivel de calidad de señal predicha para la vía de comunicación inalámbrica entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para una serie de formas de deflexión de pala de dicho perfil de deflexión característico definido,
- 35 en el que el método comprende además la etapa de:
- seleccionar la altura de dicha al menos una abrazadera tal que dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz está separado de la superficie externa de dicha pala, de manera que el nivel de calidad de la señal prevista para la vía de comunicación inalámbrica esté por encima de un límite de calidad aceptable para un intervalo definido de formas de desviación de pala de dicho perfil de deflexión característico definido.
- 40 Utilizando el perfil de desviación conocido de la pala, es posible proporcionar un método simple y eficiente para derivar la mejor ubicación del dispositivo de raíz, de tal manera que la calidad de la señal se mantenga a un nivel aceptable para un rango de formas de deflexión estimadas. Esto garantiza un funcionamiento eficaz del sistema de control de deflexión.
- Preferentemente, dicho intervalo definido de formas de deflexión de pala comprende el intervalo de deflexión certificado de dicha pala de turbina eólica.
- 45

5 Como cada pala de turbina eólica tendrá un nivel de deflexión máximo certificado, un rango de deflexión operacional de la pala puede ser visto como el intervalo de formas de deflexión entre la forma normal de reposo de la pala y la forma de deflexión máxima certificada de la pala. Al seleccionar la altura del soporte en función de este rango operativo de formas, se garantiza que el funcionamiento del sistema de control de deflexión no se verá seriamente afectado por ninguna de las formas de deflexión previstas de la pala.

Preferentemente, la altura de dicho soporte se selecciona de tal manera que una línea directa entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz pase a través de menos de un espesor de laminado de pala predefinido para dicho intervalo definido de formas de deflexión de pala.

10 Una línea directa puede ser entendida como una Línea de Visión RF (RF LOS), que es una línea directa entre un transmisor y un receptor, pasando por cualquier obstáculo que se encuentre en la trayectoria. A medida que el espesor del laminado al que pasa la señal puede determinar los efectos del multitrajecto y la atenuación de señal en la señal recibida, seleccionando la altura del soporte para asegurar que la señal transmitida pase a través de un nivel de espesor de laminado aceptable predefinido, la calidad de la señal del sistema de deflexión puede garantizarse a niveles aceptables para el intervalo de formas de deflexión previstas. Se entenderá que la señal se propagará muy probablemente a un ángulo relativamente bajo a través del laminado, y que el nivel de espesor de laminado predefinido se entiende que hace referencia al espesor del laminado en la dirección angular apropiada.

Preferentemente, dicha línea directa pasa a través de menos de dos capas de laminado de la pala de turbina eólica para dicho intervalo definido de formas de desviación de pala.

20 En el caso de que la deflexión de la pala tenga como resultado que la trayectoria de la señal entre los dispositivos de raíz y de punta tenga que pasar a través de al menos una porción del cuerpo de la pala de la turbina eólica, preferentemente la trayectoria de la señal entre dispositivos sólo pasará a través de una única capa de laminado de la pala a lo sumo. Esto puede ocurrir cuando el dispositivo de punta está provisto internamente de la pala de turbina eólica, y/o en el que la deflexión de la pala da como resultado que una porción del laminado de pala esté colocada en la Línea de Visión de RF entre los dispositivos de raíz y de punta.

25 En un aspecto, la altura de dicho soporte se selecciona de tal manera que se mantiene una línea de visión clara entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para dicho intervalo definido de formas de deflexión de pala.

30 Una línea de visión clara se entenderá que significa que no hay obstrucciones entre un transmisor y un receptor, también conocido como una línea de visión visible u óptica. Tal configuración puede requerir el uso de un soporte relativamente largo, así como un dispositivo de comunicación de punta montado externamente.

Descripción de la invención

A continuación, se describirán realizaciones de la invención, sólo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 muestra una turbina eólica;

35 La figura 2 muestra una vista esquemática de una pala de turbina eólica;

La figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil de perfil aerodinámico de la pala de la figura 2;

La figura 4 ilustra una pala de turbina eólica que tiene un sistema de monitorización de deflexión de pala de acuerdo con una realización de la invención;

40 La figura 5 es una vista en sección transversal de una realización de la pala de la figura 4 tomada en el extremo de la raíz de la pala;

La figura 6 es una vista en perspectiva isométrica de una porción del borde delantero de una realización de la pala de la figura 4;

La figura 7 es un par de bocetos ilustrativos de las trayectorias de comunicación del sistema de monitorización de deflexión de palas de la invención cuando la pala está (a) sin flexionar y (b) sujeta a flexión; y

45 La figura 8 es una vista general de un sistema de control para un sistema de monitorización de deflexión de pala de acuerdo con una realización de la invención.

Se entenderá que los dibujos adjuntos son sólo ilustrativos y no se proporcionan a escala.

La figura 1 ilustra una turbina eólica moderna convencional de acuerdo con el denominado concepto danés con una torre 4, una góndola 6 y un rotor con un eje de rotor sustancialmente horizontal. El rotor incluye un cubo 8 y tres palas 10 que se extienden radialmente desde el cubo 8, cada una teniendo una raíz de pala 16 más próxima al cubo y una punta de pala 14 más alejada del cubo 8. El rotor tiene un radio denotado R.

La figura 2 muestra una vista esquemática de una primera realización de una pala de turbina eólica 10 que puede utilizarse de acuerdo con una realización de la invención. La pala de turbina eólica 10 tiene la forma de una pala de turbina de viento convencional y comprende una región de raíz 30 más cercana al cubo, una región perfilada o de perfil aerodinámico 34 más alejada del cubo y una región de transición 32 entre la región de raíz 30 y la región de superficie aerodinámica 34. La pala 10 comprende un borde de ataque 18 que mira a la dirección de rotación de la pala 10 cuando la pala está montada en el cubo y un borde de salida 20 que mira hacia la dirección opuesta del borde de ataque 18.

La región de perfil aerodinámico 34 (también denominada región perfilada) tiene una forma de pala ideal o casi ideal con respecto a la generación de elevación, mientras que la región de raíz 30 debido a consideraciones estructurales tiene una sección transversal sustancialmente circular o elíptica, que por ejemplo facilita y hace más seguro montar la pala 10 al cubo. El diámetro (o la cuerda) de la región de raíz 30 es típicamente constante a lo largo de toda el área de raíz 30. La región de transición 32 tiene un perfil de transición 42 que cambia gradualmente de la forma circular o elíptica de la región de raíz 30 al perfil de perfil aerodinámico 50 de la región de perfil aerodinámico 34. La longitud de la cuerda de la región de transición 32 aumenta típicamente sustancialmente linealmente con la distancia creciente r desde el cubo.

La zona de perfil aerodinámico 34 tiene un perfil de perfil aerodinámico 50 con una cuerda que se extiende entre el borde delantero 18 y el borde de salida 20 de la pala 10. El ancho de la cuerda disminuye con el aumento de distancia r desde el cubo.

Debe observarse que los acordes de diferentes secciones de la pala normalmente no se encuentran en un plano común, ya que la pala puede ser retorcida y/o curvada (es decir, pre-curvada), proporcionando así el plano de acordes con un plano de torsión y/o recorrido curvado correspondiente, siendo éste el caso más frecuente para compensar la velocidad local de la pala que depende del radio desde el cubo.

La figura 3 muestra una vista esquemática de un perfil del perfil aerodinámico 50 de una pala típica de una turbina eólica representada con los diversos parámetros que se usan típicamente para definir la forma geométrica de una superficie aerodinámica. El perfil del 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, normalmente se dirigen hacia el lado de barlovento (o de sotavento) y el de sotavento (o de sotavento), respectivamente. El perfil aerodinámico 50 tiene un acorde 60 con una longitud de cuerda c que se extiende entre un borde de ataque 56 y un borde de arrastre 58 de la pala. La superficie aerodinámica 50 tiene un espesor t , que se define como la distancia entre el lado de presión 52 y el lado de succión 54. El espesor t de la superficie aerodinámica varía a lo largo del acorde 60. La desviación de un perfil simétrico está dada por una línea de curvatura 62, que es una línea mediana a través del perfil de perfil aerodinámico 50. La línea mediana se puede encontrar dibujando círculos inscritos desde el borde de ataque 56 al borde de salida 58. La línea mediana sigue los centros de estos círculos inscritos y la desviación o distancia del acorde 60 se llama la curvatura f . La asimetría también puede definirse mediante el uso de parámetros llamados la curvatura superior y la curvatura inferior, que se definen como las distancias desde el acorde 60 y el lado de succión 54 y el lado de presión 52, respectivamente.

Los perfiles de perfil aerodinámico se caracterizan a menudo por los siguientes parámetros: la longitud de la cuerda c , la inclinación máxima f , la posición df de la inclinación máxima f , el grosor máximo de la superficie aerodinámica t , que es el diámetro más grande de los círculos inscritos a lo largo de la línea a lo largo de la línea de inclinación mediana 62, la posición dt del espesor máximo t , y un radio de punta (no mostrado). Estos parámetros se definen típicamente como relaciones con respecto a la longitud de la cuerda c .

Las palas de las turbinas eólicas se forman generalmente a partir de material plástico reforzado con fibra, es decir fibras de vidrio y/o fibras de carbono que están dispuestas en un molde y curadas con una resina para formar una estructura sólida. Las palas modernas de las turbinas eólicas a menudo pueden tener más de 30-40 metros de longitud, con diámetros de la raíz de la pala de varios metros.

Haciendo referencia a la figura 4, se muestra una pala de turbina eólica 10 que tiene un sistema de monitorización de deflexión de pala según la invención. El sistema de monitorización de deflexión comprende al menos un dispositivo de comunicación inalámbrica de extremo de raíz 70 y al menos un dispositivo de comunicación inalámbrica de extremo de extremo 72. Los respectivos dispositivos inalámbricos 70, 72 son operables para establecer un enlace de comunicación y realizar una medición de alcance entre los diferentes dispositivos 70, 72. La

pala 10 puede comprender además un controlador (no mostrado) que es operable para recibir los detalles de medición de alcance a partir de los dispositivos de comunicación con el fin de determinar la deflexión medida de la pala.

5 Con el fin de minimizar los efectos de la multitrayectoria y/o la absorción de la señal, el dispositivo de comunicación del extremo de raíz 70 se proporciona en una abrazadera 74 formada por un trípode o brazo que sobresale de la superficie externa de la turbina eólica 10. El dispositivo de comunicación del extremo de raíz 70 está dispuesto en un extremo distal del soporte 74, de manera que el dispositivo de comunicación del extremo de raíz 70 está separado de la superficie externa de la pala 10. Por consiguiente, se reduce el efecto de las reflexiones desde la superficie de la pala 10 sobre el enlace de comunicaciones entre los dispositivos de raíz y de punta 70, 72, dando como resultado una calidad de señal mejorada entre los dispositivos de comunicación de raíz y de punta 70, 72.

15 Preferentemente, la altura del soporte 74 sobre la superficie de la pala se selecciona de tal manera que la calidad de la señal del enlace de comunicaciones, por ejemplo, La relación señal-ruido, se conserva por encima de un nivel de calidad predefinido durante el funcionamiento de la pala. En tal configuración, la pérdida de trayectoria del enlace de comunicaciones entre dispositivos se mantiene a niveles aceptables para el funcionamiento eficiente y eficaz del sistema de monitorización de deflexión de pala.

En un aspecto, el soporte 74 tiene una altura de aproximadamente 1 metro por encima de la superficie de la pala de turbina eólica.

20 En un aspecto, la altura por la cual la soporte 74 sobresale por encima de la superficie externa de la pala de turbina eólica está comprendida entre aproximadamente el 10 % y el 50 % del diámetro del extremo de la raíz de la pala de la turbina eólica 16, preferentemente aproximadamente el 20 % del diámetro de extremo de raíz 76. Dicha altura de soporte garantizará que se minimicen todos los efectos negativos sobre el enlace de comunicación entre los dispositivos de raíz y de punta 70, 72, sin imponer requisitos estructurales significativos para la altura del soporte y posibles cargas estructurales asociadas con el mismo.

25 En un aspecto, los dispositivos de raíz y de punta 70, 72 están situados en el borde de ataque 18 de la pala de turbina eólica 10. Dado que un dispositivo de comunicación montado en el borde delantero o de arrastre 18, 20 es menos susceptible a la flexión a la misma altura que un sensor montado en los lados de presión o succión de la pala 10 y como la magnitud de la curvatura en el sentido de borde de la pala 10 se entiende que es significativamente menor que la de la flexión en el sentido de la aleta, esto proporciona una fiabilidad mejorada de la conexión de comunicaciones entre los dispositivos de raíz y de punta 70, 72, ya que la trayectoria de comunicaciones entre dispositivos es menos probable que sea perturbada por la flexión de la pala 10. Además, como el borde de ataque 18 de una pala 10 es generalmente una superficie sustancialmente uniforme que se extiende en una dirección longitudinal desde el extremo de raíz 16 al extremo de punta 14 de la pala 10, una línea de visión se mantiene más fácilmente entre los dispositivos de raíz y de punta 70, 72 para tal disposición.

35 Adicionalmente o alternativamente, los dispositivos de raíz y de punta 70, 72 pueden estar montados en el borde de salida de la pala 20.

40 La localización de los dispositivos de raíz y de punta 70, 72 en los bordes delanteros o de arista de pala relativamente curvados 18, 20 asegura que la pérdida de trayectoria debida a la reflexión será minimizada para la trayectoria de señal entre los dispositivos, en comparación con proporcionar los dispositivos en las superficies laterales a presión o succión tales que la trayectoria de señal está dispuesta sobre tales superficies relativamente planas, dando lugar a niveles relativamente altos de reflexión de señal y pérdida de trayectoria asociada.

45 Se entenderá que el posicionamiento de los dispositivos de raíz y de punta 70, 72 se puede seleccionar basado, al menos en parte, en la longitud de onda de las señales utilizadas en el enlace de comunicaciones inalámbricas entre los dispositivos, en particular la curvatura de la pala con respecto a la longitud de onda de la señal de pulso. Preferentemente, la trayectoria de la señal de comunicación está dispuesta a lo largo de las porciones adyacentes de la pala de la turbina eólica y tiene una curvatura menor que la longitud de onda, para reducir la interferencia de reflexión en la trayectoria de la señal.

50 En una realización de un enlace de comunicación inalámbrico, las señales de comunicación inalámbrica tienen una frecuencia del orden de 4,2 GHz, lo que da como resultado una longitud de onda de aproximadamente 7 centímetros. En tal caso, el borde delantero de la pala tendrá una curvatura relativamente mayor, cuando se compara con la longitud de onda de señal, con el resultado de que el borde delantero, mientras está curvado, actuará como una superficie plana para las señales inalámbricas. La superficie plana conducirá entonces a un mayor efecto de reflexión sobre la trayectoria de la señal, e incrementa la interferencia de la señal.

En comparación, el borde de salida de una pala tendrá una curvatura más próxima a la de la longitud de onda de señal, con el resultado de que la superficie curvada producirá una difracción de la señal desde la superficie. Dicho

efecto de difracción se extenderá sobre un área relativamente amplia y, en consecuencia, tendrá un efecto mínimo sobre la intensidad de la señal de la trayectoria de la señal de comunicación entre los dispositivos.

5 Se comprenderá que los dispositivos pueden estar situados en una pala de turbina eólica de manera que la calidad de la señal del enlace de comunicaciones entre dispositivos aumente a medida que la pala de turbina eólica es desviada hacia una torre de turbina eólica. Por ejemplo, los dispositivos pueden estar situados de tal manera que la deflexión de la pala hacia una torre da como resultado menos pérdida de trayectoria entre los dispositivos, por ejemplo, debido a superficies menos reflectantes situadas a lo largo de la línea de visión RF entre dispositivos. En esta configuración, la señal entre dispositivos se hace más clara y precisa a medida que se desvía la pala, de manera que el sistema de control de deflexión se vuelve más preciso durante periodos en los que aumenta la importancia de la monitorización de deflexión.
10

En una realización preferida de la invención, preferentemente se proporcionan primero y segundo dispositivos de comunicación de extremo 70a, 70b. La figura 5 ilustra una vista en sección transversal del primer y segundo dispositivos de comunicación del extremo de raíz 70a, 70b situados en el extremo de raíz sustancialmente circular 16 de la pala 10. Los dispositivos de raíz 70a, 70b están dispuestos en los extremos distales de los respectivos primer y segundo soportes 74a, 74b.
15

Los soportes 74a, 74b sobresalen de la superficie externa de la pala de turbina eólica 10, estando previstos los primer y segundo soportes 74a, 74b en lados opuestos del borde delantero 18 de la pala de turbina eólica 10. La figura 6 ilustra los dispositivos extremos de extremo y raíz dispuestos a lo largo de una vista del borde de ataque 18 de la pala de turbina eólica.

20 Preferentemente, se proporcionan al menos dos dispositivos extremos de punta 72a, 72b en la pala de turbina eólica 10, espaciados a lo largo de la dirección longitudinal de la pala 10 hacia el extremo 14 de punta de pala. Como se indica en la figura 6, realizando una medición de alcance entre (a) el primer dispositivo de raíz 70a y el primer dispositivo de punta 72a, y (b) el segundo dispositivo de raíz 70b y el primer dispositivo de punta 72a, un controlador es operable para determinar la posición del primer dispositivo de punta 72a usando técnicas de trilateración y/o triangulación. Por consiguiente, el movimiento del primer dispositivo de punta 72a puede monitorizarse para determinar la deflexión de la pala de turbina eólica 10.
25

De forma similar, se lleva a cabo una medición del intervalo entre (a) el primer dispositivo de raíz 70a y el segundo dispositivo de punta 72b, y (b) el segundo dispositivo de raíz 70b y el segundo dispositivo de punta 72b, para determinar la posición del segundo dispositivo de punta 72b usando técnicas de trilateración y/o de triangulación. Esto permite que el movimiento del segundo dispositivo de punta 72b sea monitorizado adicionalmente, para determinar la deflexión de la pala en un segundo punto a lo largo de la longitud de la pala de la turbina eólica 10.
30

La provisión de dos puntos de medición separados en la pala de turbina eólica 10 indicada por la ubicación de los dispositivos de punta primera y segunda 72a, 72b permite que las mediciones de los momentos de las palas durante el funcionamiento de las palas sean controladas adicionalmente por el controlador.

35 Haciendo referencia a la figura 5, la altura de los soportes 74a, 74b se selecciona de tal manera que los dispositivos de raíz 70a, 70b dispuestos en los extremos distales de los soportes respectivos 74a, 74b están situados a una altura H por encima de la superficie externa de la pala de turbina eólica. Además, los soportes 74a, 74b están situados de manera que los respectivos dispositivos de raíz 70a, 70b están separados por una distancia D, preferentemente por encima del borde delantero 18 de la pala 10.

40 Puesto que las características de deflexión de la pala 10 de turbina eólica pueden determinarse a partir de los detalles de la construcción de palas y adicionalmente como cada pala de turbina eólica 10 tiene un nivel de deflexión certificado máximo que define un intervalo permisible de formas de deflexión de pala, es posible configurar la disposición del sistema de monitorización de deflexión de pala de la invención en base a la pala de turbina eólica en cuestión.

45 En un aspecto, los respectivos dispositivos de punta 72a, 72b están previstos en el exterior de la pala de turbina eólica 10, donde existe una línea de visión clara entre los dispositivos de raíz 70a, 70b y los dispositivos de punta 72a, 72b. Preferentemente, la altura H de los soportes 74a, 74b se selecciona de tal manera que entre los dispositivos de raíz 70a, 70b y los dispositivos de punta 72a, 72b, no hay obstrucciones, para todas las formas de deflexión de la deflexión certificada para la pala de turbina eólica 10.

50 En un aspecto alternativo, los respectivos dispositivos de punta 72a, 72b están previstos en el interior de la pala de turbina eólica 10, en donde el enlace de comunicación entre los dispositivos de raíz 70a, 70b y los dispositivos de punta 72a, 72b pasa a través de una porción del laminado estructural de la pala 10 de la turbina eólica, como puede verse en la figura 7.

- Preferentemente, la altura H de los soportes 74a, 74b se selecciona de tal manera que se pueda mantener una línea de visión RF entre los respectivos dispositivos de raíz y de punta 70a, 70b, 72a, 72b, de tal manera que el enlace de comunicación se mantenga entre los dispositivos de raíz y de punta 70a, 70b, 72a, 72b para todas las formas de deflexión de la deflexión certificada para la pala de turbina eólica 10, sin caer por debajo de niveles de calidad de señal aceptables. Preferentemente, la altura del soporte 74a, 74b se selecciona de tal manera que, para todas las formas de deflexión certificadas, una línea de visión directa de RF entre los dispositivos de raíz 70a, 70b y los dispositivos de punta 72a, 72b sólo pasará a través de una única capa del laminado estructural de la pala 10.
- 5 Dado que la señal sólo pasará a través de una única capa de laminado entre dispositivos, la señal recibida se ve menos afectada por reflexiones desde superficies adicionales entre los dispositivos de punta y raíz.
- 10 Adicionalmente o alternativamente, la altura H de los soportes 74a, 74b se selecciona de tal manera que, para todas las formas de desviación certificadas, una línea de visión directa de RF entre los dispositivos de raíz 70a, 70b y los dispositivos de punta 72a, 72b pasará a través de un espesor máximo del laminado de pala de aproximadamente 20 centímetros.
- 15 Adicional o alternativamente, en la figura 7(b) se selecciona la altura H de los soportes 74a, 74b de modo que, para todas las formas de deflexión certificadas, la trayectoria de comunicaciones entre los dispositivos de raíz 70a, 70b y el primer dispositivo de punta 72a no se solape con la trayectoria de comunicaciones entre los dispositivos de raíz 70a, 70b y el segundo dispositivo de punta 72b, reduciendo así el efecto de cualquier interferencia entre los enlaces de comunicaciones entre dispositivos.
- 20 En un aspecto, la altura H del soporte está entre 10 % - 50 % del diámetro del extremo de la raíz de la pala de turbina eólica, preferentemente aproximadamente 25 - 30 %.
- En una realización, la altura de soporte H está entre aproximadamente 0,5 - 3 metros, preferentemente aproximadamente 1 - 2 metros.
- En un aspecto, la distancia entre los dispositivos de raíz D está entre 75 - 200 % del diámetro del extremo de la raíz de la pala de turbina eólica, preferentemente entre aproximadamente 100 - 150 %.
- 25 Al espaciar los dispositivos de la raíz relativamente alejados entre sí, se mejora la precisión de la medición de trilateración y/o triangulación.
- En una realización, la distancia D está entre aproximadamente 0,5 - 5 metros, preferentemente entre aproximadamente 1 - 3 metros, más preferentemente aproximadamente 2 metros.
- 30 En un aspecto adicional, preferentemente los dispositivos de raíz están situados dentro del 0 - 25 % de la longitud de la pala desde el extremo de la raíz de la pala. Preferentemente, los dispositivos de raíz están situados a 10 metros a lo largo de la dirección longitudinal de la pala desde el extremo de la raíz de la pala.
- 35 Se entenderá que dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y/o dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz se seleccionan de uno de los siguientes: un receptor, un transmisor, un circuito receptor-transmisor o un transceptor. Se comprenderá además que el al menos un dispositivo de comunicación de punta puede comprender una antena proporcionada hacia dicho extremo de punta, estando acoplada la antena a un receptor, transmisor, receptor o transmisor-receptor proporcionado en una ubicación separada, por ejemplo, hacia el extremo de la raíz de la pala.
- 40 Preferentemente, los dispositivos de punta 72a, 72b están situados hacia el extremo de punta 14 de la pala de turbina eólica 10. Preferentemente, el segundo dispositivo de punta 72b está situado próximo al extremo de punta 14 y el primer dispositivo de punta 72a está situado entre el segundo dispositivo de punta 72b y el extremo de raíz 16 de la pala 10.
- En un aspecto, el segundo dispositivo de punta 72b está situado en la pala entre 95 - 100 % de la longitud de la pala desde el extremo de raíz 16 y el primer dispositivo de punta 72a está situado entre 90 - 95 % de la longitud de la pala desde el extremo raíz 16.
- 45 En una realización, el segundo dispositivo de punta 72b está situado a 2 metros del extremo de punta 14 de la pala 10, preferentemente aproximadamente 1 metro, y el primer dispositivo de punta 72a está situado a 5 metros del extremo de punta 14 de la pala 10, preferentemente aproximadamente 2,5 metros.
- 50 La pala de viento comprende formas de modo en las que vibra, o se deforma. El análisis modal se puede realizar en las palas de la turbina eólica, para determinar las frecuencias propias de la pala y las formas del modo. En un aspecto, los dispositivos de punta se colocan en base a las formas de modo conocidas de la pala de turbina eólica,

en particular las formas de primer y segundo orden de la pala, las formas de modo 1 y modo 2 de la pala. En tales formas de modo conocidas, un nodo es un punto en la estructura que no oscila para una forma de modo particular.

5 Cualquier deflexión medida en un punto en la pala será una superposición de todos los modos que se salen. La gran mayoría de dicha deflexión será de las formas de modo primero y segundo, ya que tienen la mayor cantidad de energía. En consecuencia, es ventajoso centrarse en las dos primeras formas de modo que se salen sobre la pala, ya que la tercera y más arriba tienen muy poca energía.

10 Al medir dos posiciones en la pala, es posible tener dos ecuaciones con dos incógnitas (las coordenadas de modo 1 y de modo 2), y así determinar la cantidad de excitación de modo 1 y modo 2 en la deflexión de pala actual. Teniendo las dos primeras coordenadas de la forma del modo, y conociendo la rigidez de la pala, es posible calcular la deflexión, y momento de flexión en cualquier localización de la lámina de la extremidad a la raíz.

Se entenderá que pueden seleccionarse cualesquiera dos posiciones de medición a lo largo de la longitud de la pala para determinar las formas de modo 1 y modo 2.

15 Preferentemente, el segundo dispositivo de punta 72b está dispuesto en una posición entre el nodo de la forma de modo 2 y el extremo de punta de la pala, y el primer dispositivo de punta 72a está previsto en la ubicación del nodo de dicha forma de modo 2. Incluso con una pequeña incertidumbre en la colocación de este primer dispositivo de punta 72a, no detectará la deformación de forma de forma 2. Por consiguiente, se realiza una medición de la forma de modo 1 sin la influencia de la forma de modo 2.

20 El segundo dispositivo de punta 72b se sitúa preferentemente cerca de la punta para obtener una buena medición de la posición de la punta. Esta posición de medición será una superposición de las deformaciones de la forma de modo 1 y de la forma de modo 2. Para obtener la segunda forma de modo se deben resolver las dos ecuaciones con dos incógnitas.

25 Alternativamente, el segundo dispositivo de punta 72b está dispuesto en un lugar entre el nodo de la forma de modo 2 y el extremo de punta de la pala y el primer dispositivo de punta 72a está dispuesto en una ubicación entre el nodo de dicha forma de modo 2 y el extremo de raíz de la pala. Además, alternativamente, los primeros y segundos dispositivos de punta 72a, 72b están dispuestos en un lugar entre el nodo de la forma de modo 2 y el extremo de punta de la pala, estando el primer dispositivo de punta 72a separado de dicho segundo dispositivo de punta 72b a lo largo de la dirección longitudinal de la pala. Las formas de modo 1 y modo 2 pueden determinarse usando ecuaciones simultáneas.

30 Controlando la deflexión de dos puntos separados relacionados con las formas de modo 1 y de modo 2 de la pala, es posible derivar el nivel de excitación de las formas de modo de pala. En consecuencia, los momentos de la pala, en particular los momentos de inclinación y de guiñada de la pala, pueden derivarse de la deflexión de los dispositivos. Este sistema proporciona una considerable ventaja sobre los sistemas de la técnica anterior, que no pueden determinar los momentos de las palas a partir de la deflexión monitorizada de la pala.

35 En un aspecto, al menos una porción de la pala de turbina eólica 10 puede estar revestida con un material absorbente de ondas de radio, que actúa para reducir la reflectividad de radio de la estructura de pala, reduciendo de este modo los efectos de trayectos múltiples sobre el enlace de comunicaciones entre los dispositivos de punta y de raíz. En un aspecto preferido, el material absorbente de ondas de radio se proporciona en al menos una porción de la pala adyacente a la línea de visión de RF entre los dispositivos de raíz y los dispositivos de punta. En un aspecto adicional o alternativo, la superficie de la pala de turbina eólica 10 próxima a la línea de visión RF entre los dispositivos de raíz y los dispositivos de punta puede tratarse para reducir la reflectividad o para asegurar que las señales reflejadas desde dichas superficies se dispersan sobre un área relativamente más amplia en comparación con las señales reflejadas desde una superficie no tratada, de tal manera que se reducen adicionalmente los efectos de trayectos múltiples sobre el enlace de comunicaciones. Dicho tratamiento superficial puede comprender la provisión de abrasiones o incoherencias relativamente pequeñas en la superficie de la pala, para proporcionar una dispersión más amplia de las señales reflejadas.

Preferentemente, el enlace de comunicaciones utiliza tecnología de banda ultra-ancha (UWB), pero se entenderá que se puede usar cualquier otra tecnología de comunicación y de alcance basada en radio adecuada.

50 Se entenderá que los soportes 74a, 74b pueden estar formados a partir de cualquier estructura adecuada, por ejemplo, una barra de proyección, una construcción de trípode. Preferentemente, los soportes 74a, 74b comprenden una construcción de bastidor abierto, por ejemplo, una construcción de trípode de marco abierto, de tal manera que los soportes 74a, 74b presentan una mínima resistencia al viento y/o ruido operativo durante el funcionamiento de la turbina eólica.

Otras características del sistema de la invención pueden incluir el uso de diseños de antena especializados tales

como antenas polarizadas direccionales o circulares para los dispositivos de raíz o punta, con el fin de mejorar aún más el enlace de comunicaciones entre los dispositivos y/o la implementación de técnicas de detección de la forma de pulso para señales recibidas.

5 Se entenderá que el sistema puede ser adaptado a una pala de turbina eólica existente. Por ejemplo, al menos un dispositivo de comunicación de punta puede estar unido a una pala de turbina eólica hacia el extremo de punta de pala, y al menos un dispositivo de comunicación de raíz puede estar unido al extremo de raíz de la pala.

Se entenderá que el sistema de control de deflexión de pala de la invención puede comprender cualquier sistema de control adecuado para el funcionamiento eficiente y eficaz del sistema.

10 La figura 8 muestra un esquema de control para un sistema de monitorización de deflexión de pala de acuerdo con un aspecto de la invención, que puede implementarse con cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente. Se comprenderá que el sistema de control puede ser implementado en un controlador dedicado incorporado en una pala individual, o puede ser implementado en un controlador de turbina eólica de uso general.

15 En la inicialización del esquema de control (etapa 100), el controlador actúa para establecer un enlace de comunicación entre el al menos un dispositivo de comunicación de raíz y el al menos un dispositivo de comunicación de punta, como se describe en las realizaciones anteriores.

20 En la etapa 102, el controlador ordena al sistema que transmita una señal desde un primer dispositivo de comunicación a ser recibido por un segundo de los dispositivos de comunicación (etapa 104). Se entenderá que se puede usar cualquier sistema de transmisión adecuado, por ejemplo, al menos un dispositivo de raíz puede ser instruido para transmitir una señal que ha de ser recibida por el al menos un dispositivo de punta, o viceversa, o el sistema puede ser operable para transmitir una señal de un primer dispositivo a un segundo dispositivo, que es entonces reflejado de nuevo al primer dispositivo.

25 La señal transmitida puede estar en cualquier forma adecuada, por ejemplo, puede usarse una señal de tipo "ping", para medir el tiempo de ida y vuelta para un mensaje enviado entre los diferentes dispositivos de comunicación del enlace de comunicación. Adicional o alternativamente, la señal transmitida puede comprender datos codificados relativos a una medición de posición, por ejemplo, coordenadas de GPS y/o una indicación de marca de tiempo, que puede usarse para determinar el tiempo de vuelo de la señal, y la distancia asociada implicada en el enlace de comunicación. La señal puede ser una simple señal de distancia, permitiendo que los diferentes dispositivos de comunicación se bloqueen en la señal y determinen el tiempo de vuelo, etc., y que no contengan datos codificados. Alternativamente, la señal puede ser una señal modulada en datos, que es operable para transmitir datos entre los
30 diferentes dispositivos de comunicación, por ejemplo, Datos procedentes de un módulo de pala, tales como datos de calibración procedentes de acelerómetros proporcionados hacia el extremo de punta de la pala, salidas de datos desde sensores remotos situados en el extremo de punta, etc., y/o una señal de control para un dispositivo activo de pala, por ejemplo, una aleta activa situada hacia el extremo de la punta de la pala.

35 Basándose en la señal recibida en la etapa 104, el controlador puede funcionar para analizar la calidad de la señal recibida, por ejemplo, la intensidad de la señal y/o la relación señal a ruido, y para ajustar la ganancia de la señal transmitida en la etapa 102 basado en este análisis. Esto permite mejorar el rendimiento del sistema de control de deflexión, ya que la ganancia de señal puede aumentarse para condiciones en las que la intensidad de señal recibida inicialmente es baja o tiene una alta relación señal/ruido, aumentando de este modo la fiabilidad del sistema de control de deflexión aumentando la calidad de la señal recibida. Además, en los casos en que la calidad de la
40 señal recibida está por encima de los límites aceptables, el controlador puede ser operable para reducir la ganancia de señal de la señal transmitida con el fin de reducir los requisitos de potencia del sistema de control de deflexión.

45 En algunos casos, el controlador puede operar para monitorizar continuamente la señal recibida basándose en el ajuste de la ganancia de señal de la señal transmitida y puede determinar que la calidad de la señal recibida es afectada por efectos de multipista o reflexión incrementados sobre la señal. En tales casos, el controlador puede ser operable para reducir la ganancia de señal de la señal transmitida, con el fin de reducir la magnitud de las señales reflejadas, proporcionando de este modo una calidad de señal mejorada de la señal recibida.

50 En la etapa 106, la señal recibida es utilizada por el controlador para determinar la deflexión de la pala. Como la señal recibida se usa para determinar una medición de alcance, la distancia del al menos un dispositivo de comunicación de punta desde al menos un dispositivo de comunicación de raíz se puede medir, con cambios en esta distancia una indicación de deflexión de pala, al menos en la ubicación de dicho al menos un dispositivo de punta. En sistemas que emplean al menos dos dispositivos de raíz, la posición del al menos un dispositivo de punta puede determinarse usando técnicas de trilateración o triangulación, para medir con mayor precisión la deflexión de la pala en la ubicación del dispositivo de punta.

Basándose en la deflexión detectada de la pala, el controlador puede operar para instruir a la turbina eólica para

realizar una operación de control (etapa 108) con el fin de evitar, o al menos reducir el riesgo de, un golpe de la torre de las palas de la turbina eólica. Esto puede implicar la realización de una operación de cabeceo para una o todas las palas de la turbina eólica, el frenado de la turbina eólica para detener la rotación de la pala y/o el accionamiento de un mecanismo de articulación para al menos una porción de la pala, aumentado.

5 En los casos en los que se conoce el perfil de deflexión de la pala de turbina eólica en cuestión y/o se conocen los efectos de diferentes formas de deflexión de las palas sobre la calidad de las señales transmitidas y recibidas a lo largo del enlace de comunicación del sistema de control de deflexión, puede ser ventajoso ajustar la ganancia de señal basándose en la forma de deflexión de la pala, proporcionando de este modo una respuesta más rápida a condiciones de comunicaciones potencialmente adversas. Por consiguiente, basándose en la deflexión determinada de la etapa 106, el controlador puede ser accionable para ajustar la ganancia de señal de la señal transmitida sobre la base de dicha deflexión determinada (etapa 112).

15 Adicional o alternativamente, el controlador puede ser operable para registrar la deflexión medida de la pala de la turbina eólica y, en consecuencia, predecir un probable perfil de deflexión futuro para la pala, basado al menos en parte en el patrón de deflexión histórico de la pala y/o las condiciones ambientales pronosticadas, por ejemplo la velocidad del viento, en el turbina eólica. En tal caso, en la etapa 112, el ajuste de la ganancia de señal para la señal transmitida puede basarse entonces al menos en parte en la forma de deflexión predicha de la pala de turbina eólica.

20 Tal esquema de control adaptativo para el enlace de comunicación entre los dispositivos de raíz y de punta puede proporcionar un rendimiento mejorado del sistema de monitorización de deflexión, dando como resultado una precisión, velocidad y consumo de energía mejorados del sistema.

Se comprenderá que las etapas 110 y 112 son independientes y pueden implementarse por separado en sistemas de control individuales de acuerdo con la invención.

25 La invención proporciona un sistema y un método para asegurar una monitorización precisa de la deflexión de la pala, que tiene una calidad de señal mejorada y una pérdida de trayecto reducida entre dispositivos. Como resultado de esta configuración, el sistema de control de deflexión tiene requisitos de potencia relativamente bajos, y proporciona una fiabilidad mejorada en comparación con los sistemas de control de deflexión inalámbrica de la técnica anterior. Además, como todos los componentes del sistema de monitorización, es decir, los dispositivos de raíz y los dispositivos de punta, se proporcionan dentro del marco de paso de la pala de turbina eólica en cuestión, esto elimina la necesidad de una compensación de señal relativamente complicada para señales medidas, por ejemplo, debido al cabeceo de la pala cuando algunos componentes están montados en un cubo de turbina eólica o debido a la guiñada de la turbina cuando algunos componentes están montados en una torre de turbina eólica.

30 La invención no se limita a las realizaciones descritas en este documento, y puede ser modificada o adaptada sin apartarse del alcance de la presente invención.

REIVINDICACIONES

1. Una pala de turbina eólica que comprende un cuerpo de perfil de perfil aerodinámico que tiene un lado de presión y un lado de succión, y un borde delantero y un borde de salida con una longitud de cuerda que se extiende entre la pala, teniendo la pala un extremo de punta y un extremo de raíz, comprendiendo además la pala de turbina eólica:

5 al menos un dispositivo de comunicación de punta situado hacia dicho extremo de punta,

al menos un dispositivo de comunicación de raíz situado hacia dicho extremo de raíz, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz en comunicación de radio inalámbrica con dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta a través de un trayecto de comunicación inalámbrico para monitorizar la distancia entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para determinar un movimiento de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta con respecto a dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz indicativo de una deflexión de la pala,

10

caracterizada porque

dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz se proporciona en al menos un soporte que sobresale de una superficie externa de dicha pala de turbina eólica en dicho extremo de raíz, en el que dicho dispositivo de comunicación de raíz está separado de la superficie externa de dicha pala para minimizar la pérdida de trayectoria en la trayectoria de comunicación entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz.

15

2. La pala de turbina eólica según la reivindicación 1, en la que dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de dicha pala de turbina eólica, estando dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz situado en un extremo distal de dicho al menos un soporte, teniendo la pala de turbina eólica una forma de deformación máxima característica para la pala de turbina eólica, en la que la longitud por la cual dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de la pala de turbina eólica se selecciona sobre la base de dicha forma de deformación máxima característica, de manera que la pérdida de trayectoria de la trayectoria de comunicación entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz está por debajo de un nivel de pérdida de trayectoria aceptable predeterminado.

20

25

3. La pala de turbina eólica según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en la que dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de dicha pala de turbina eólica, estando dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz situado en un extremo distal de dicha al menos un soporte, en la que se proporciona dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta en la superficie externa de la pala de turbina eólica, teniendo la pala de turbina eólica un rango de formas de deflexión certificadas, en la que

30

la longitud por la que dicho al menos un soporte se proyecta desde la superficie externa de la pala de turbina eólica se selecciona de tal manera que se mantiene una trayectoria de comunicación de línea de visión entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para dicho rango de formas de deflexión certificadas de dicha pala.

35

4. La pala de turbina eólica según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en la que dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta está provisto internamente del cuerpo de pala o está dispuesto externamente al cuerpo de pala.

5. La pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que al menos una de dicha al menos una comunicación de raíz y dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta están situados hacia el borde delantero o el borde de salida de dicha pala de turbina eólica.

40

6. La pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la ubicación de dichos dispositivos de comunicación está configurada de tal manera que la señal de comunicación entre dichos dispositivos de comunicación se propaga a lo largo del borde delantero o de salida de la pala de turbina eólica, y en la que la inclinación en el sentido de la aleta de la pala de turbina eólica da como resultado un cambio máximo en el tiempo de propagación de la señal.

45

7. La pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la pala de turbina eólica comprende un primer dispositivo de comunicación de raíz dispuesto en una primera abrazadera y un segundo dispositivo de comunicación de raíz dispuesto en una segunda abrazadera, el primer y segundo dispositivos de comunicación de raíz proporcionados o hacia el borde delantero o de salida, en el que dicho primer dispositivo de comunicación de raíz está situado en el lado de presión del borde delantero o el borde de salida de la pala y dicho segundo dispositivo de comunicación de raíz está situado en el lado de succión del borde delantero o del borde de salida de la pala.

50

- 5 8. La pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la pala de turbina eólica comprende un primer dispositivo de comunicación de punta situado en una primera posición a lo largo de la pala de turbina eólica hacia el extremo de punta de la pala y un segundo dispositivo de comunicación de punta situado en una segunda posición a lo largo de la longitud de la pala de turbina eólica hacia el extremo de punta de la pala, en el que dicha primera posición está separada de dicha segunda posición, estando situada dicha segunda posición entre dicha primera posición y dicho extremo de punta.
- 10 9. La pala de turbina eólica según la reivindicación 8, teniendo la pala de turbina eólica una forma de modo 1 y una forma de modo 2, en la que dicho primer dispositivo de comunicación de punta está situado a lo largo de la longitud de la pala en el nodo de dicha forma de modo 2, y en la que dicho segundo dispositivo de punta de comunicación está situado hacia dicho extremo de punta, de manera que la excitación de la forma de modo 1 y de modo 2 de la pala de turbina eólica puede determinarse a partir de la deflexión de dichos dispositivos de comunicación de punta primero y segundo.
- 15 10. La pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz es operable para determinar la ubicación de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta usando trilateración y/o triangulación.
- 20 11. La pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en la que la pala de turbina eólica comprende al menos un componente de procesador acoplado comunicativamente a al menos uno de dichos dispositivos de comunicación, en el que dicho al menos un componente de procesador está dispuesto en una carcasa de controlador situada en o adyacente al extremo de raíz de la pala de turbina eólica, en el que dicho al menos un componente de procesador se selecciona de al menos uno de los siguientes: un receptor, un transmisor, un circuito receptor-transmisor, un transceptor, un controlador.
- 25 12. Una turbina eólica que tiene al menos una pala de turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-11.
- 30 13. Una turbina eólica según la reivindicación 12, que comprende además un sistema de control de paso operable para ajustar el paso de al menos una pala de turbina eólica de dicha turbina eólica, en el que la entrada a dicho sistema de control de paso está al menos parcialmente basada en el movimiento determinado de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta con respecto a dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz indicativo de una deflexión de pala.
- 35 14. Un método para diseñar un sistema de monitorización de palas para su uso en una pala de turbina eólica de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1-11, comprendiendo el método las etapas de:
proporcionar una pala de turbina eólica que comprende un cuerpo de perfil de perfil aerodinámico que tiene un lado de presión y un lado de succión, y un borde delantero y un borde de salida con una longitud de cuerda que se extiende entre ellos, teniendo la pala un extremo de punta y un extremo de raíz y un perfil de deflexión característico definido,
proporcionar al menos un dispositivo de comunicación de punta situado hacia dicho extremo de punta,
proporcionar al menos un dispositivo de comunicación de raíz situado hacia dicho extremo de raíz, dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz en comunicación inalámbrica con dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta a través de un trayecto de comunicación inalámbrica, para monitorizar la distancia entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para determinar un movimiento de dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta con respecto a dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz indicativo de una deflexión de la pala,
proporcionar al menos un soporte que sobresale de una superficie externa de dicha pala de turbina eólica en dicho extremo de raíz, en el que dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz se proporciona en dicho al menos un soporte, y
45 calcular un nivel de calidad de señal prevista para la vía de comunicación inalámbrica entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para una serie de formas de deflexión de pala de dicho perfil de deflexión característico definido,
en el que el método comprende además la etapa de:
50 seleccionar la altura de dicho al menos un soporte tal que dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz está separado de la superficie externa de dicha pala, de manera que el nivel de calidad de la señal prevista para la vía de comunicación inalámbrica esté por encima de un límite de calidad aceptable para un intervalo definido de las

formas de desviación de pala de dicho perfil de deflexión característico definido.

15. El método según la reivindicación 14, en el que la altura de dichos soportes se selecciona de tal manera que se mantiene una línea clara de visión entre dicho al menos un dispositivo de comunicación de punta y dicho al menos un dispositivo de comunicación de raíz para dicho intervalo definido de formas de deflexión de pala.

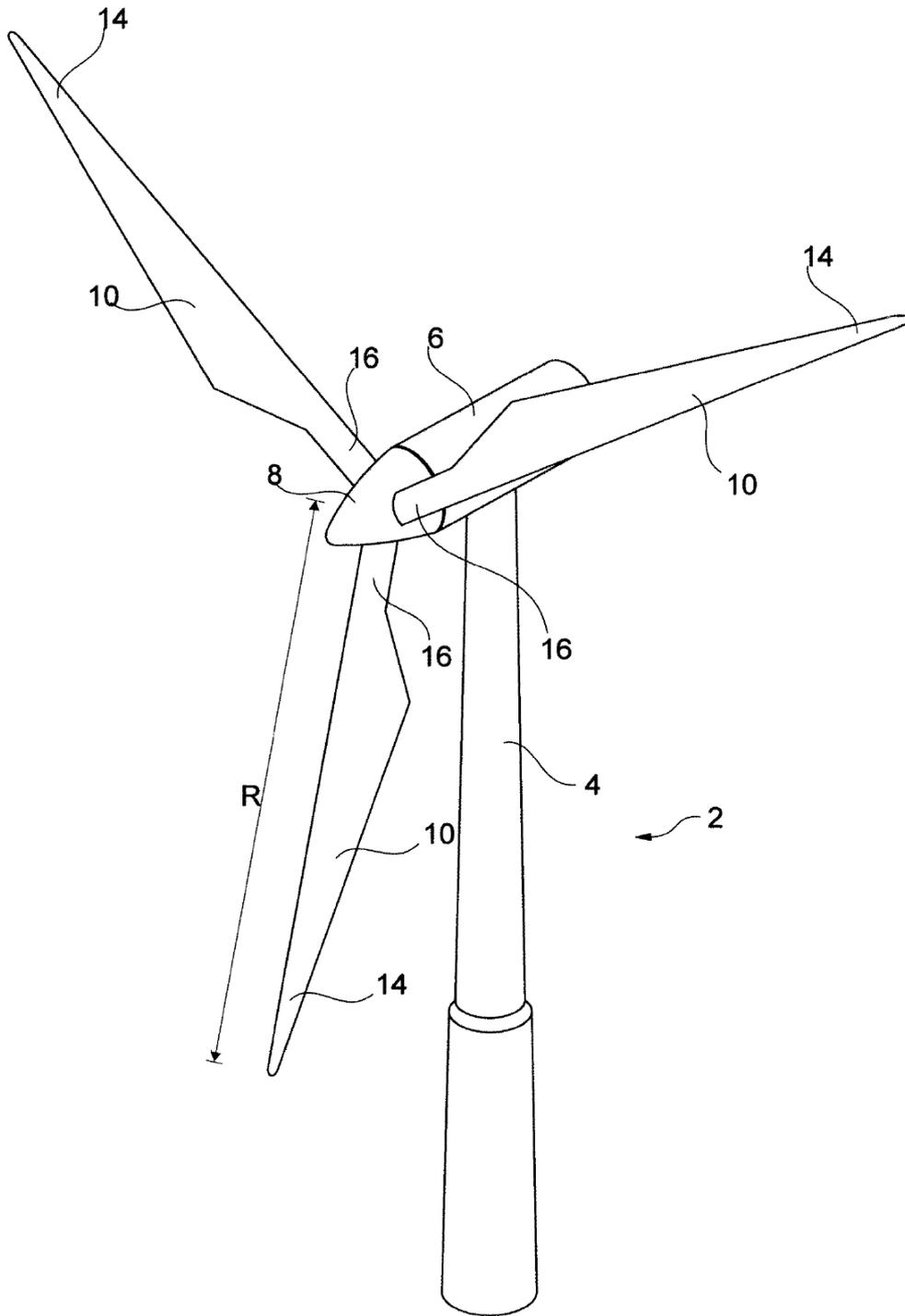


Fig. 1

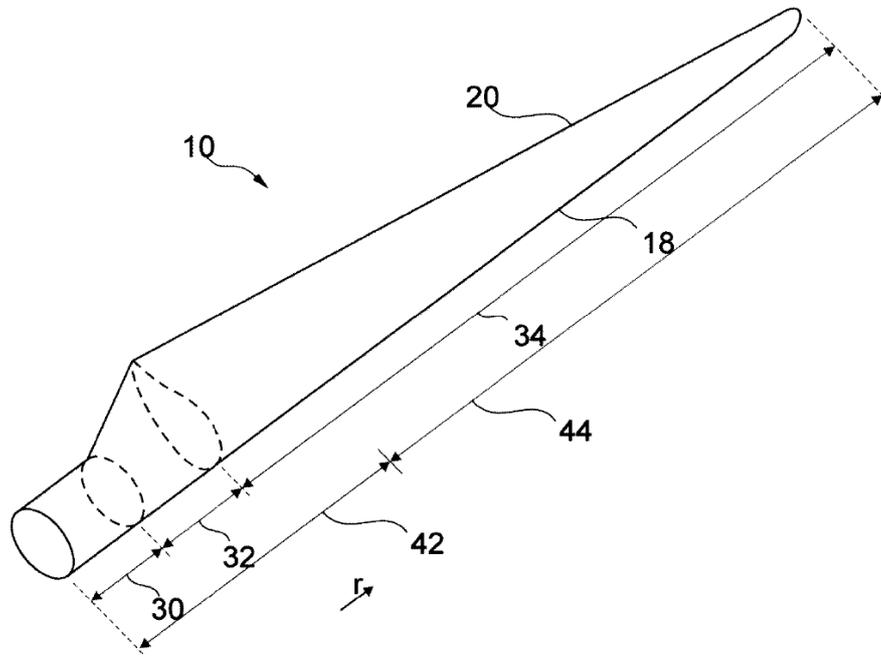


Fig.2

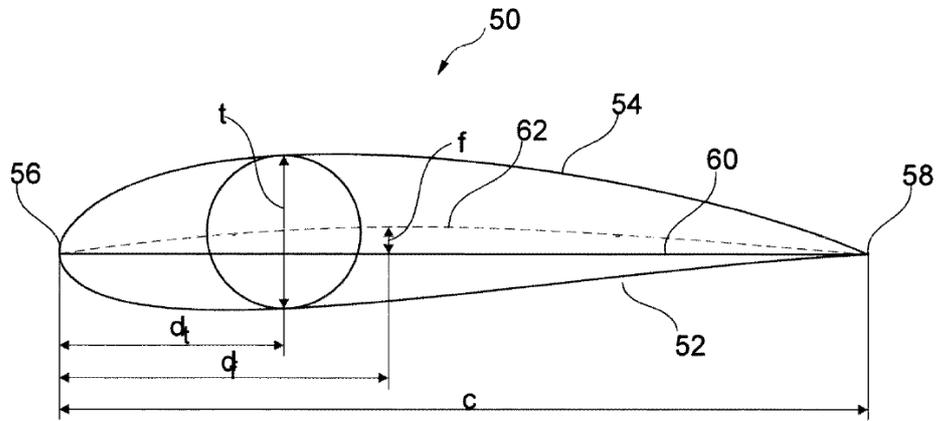


Fig. 3

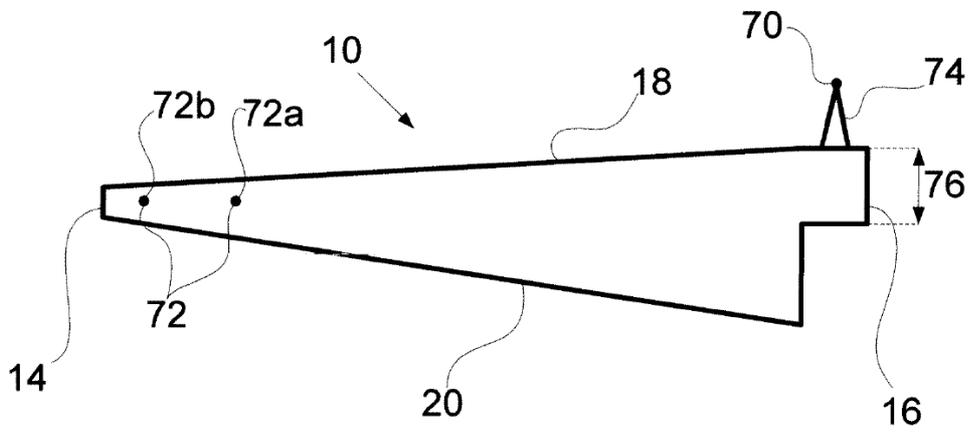


Fig. 4

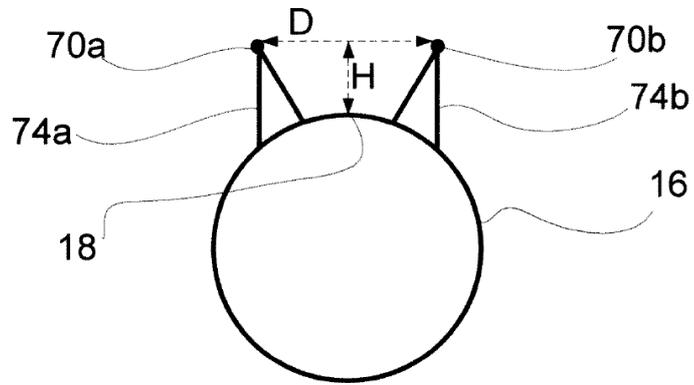


Fig. 5

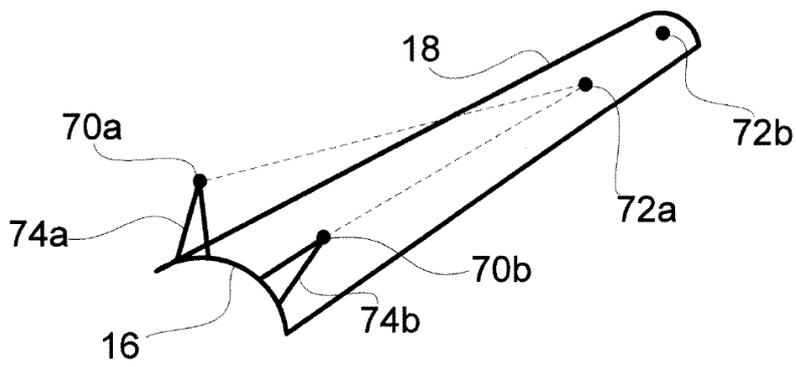


Fig. 6

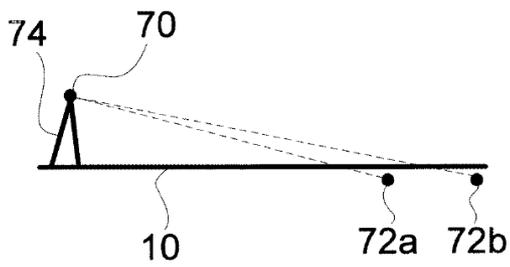


Fig. 7(a)

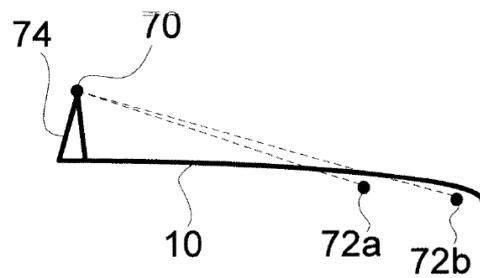


Fig. 7(b)

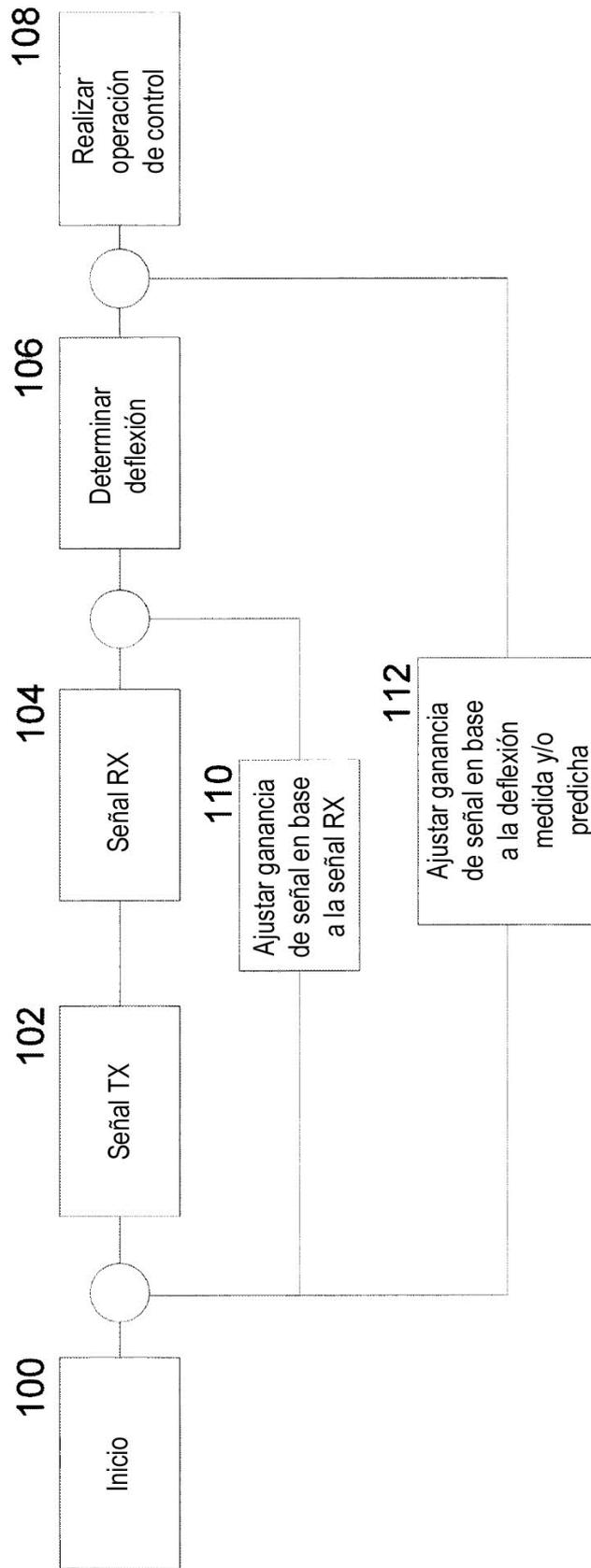


Fig. 8