

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 592 939**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.07.2011 PCT/DK2011/050291**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.02.2012 WO12013195**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.07.2011 E 11738599 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.08.2016 EP 2598750**

54 Título: **Mejoras respecto a turbinas eólicas**

30 Prioridad:

**26.07.2010 US 367535 P**  
**26.07.2010 GB 201012478**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**02.12.2016**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**  
**Hedeager 42**  
**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**WEDEL-HEINEN, JENS JAKOB**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 592 939 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

Mejoras respecto a turbinas eólicas

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a turbinas eólicas y al control de turbinas eólicas.

**Antecedentes**

10 A modo de antecedentes respecto a la presente invención, la Figura 1 y la Figura 1A muestran una turbina eólica 10 de eje horizontal de la técnica anterior que comprende una torre 11, un rotor 12 y una góndola 13. La góndola 13 está soportada en un extremo superior 14 de la torre 11, que puede estar a 100 metros por encima del nivel del suelo 15 para una turbina de multimegavatios. La góndola 13 aloja el árbol del rotor, el generador y la caja de engranajes (si la hubiera). Un dispositivo de supervisión del viento 16 está localizado encima de la góndola 13. El dispositivo de supervisión de viento 16 incluye un anemómetro 17 para supervisar la velocidad del viento y una veleta 18 para supervisar la dirección del viento en un plano horizontal.

20 El rotor 12 está soportado por la góndola 13 e incluye tres palas de rotor 19a, 19b, 19c. Solo se muestran dos palas 19a, 19b en la vista lateral de la Figura 1. Sin embargo, las tres palas 19a, 19b, 19c pueden verse en la vista frontal de la Figura 1A. Haciendo referencia a la Figura 1A, las palas 19a, 19b, 19c están separadas equitativamente alrededor de un cubo de rotor central 20, y se extienden radialmente desde el cubo 20 cuando se ven desde delante, en una dirección de extensión desde la raíz 21 hasta la punta 22. A medida que gira el rotor 12, las puntas 22 de las palas 19a, 19b, 19c barren un área circular 23 conocida como el "disco del rotor", que está representada por una línea discontinua 24 en la Figura 1A, y una línea vertical discontinua 24 en la Figura 1.

30 Haciendo referencia de nuevo a la Figura 1, el rotor 12 está montado a barlovento de la torre 11 y está orientado directamente hacia el viento, que está representado por las flechas 25. La turbina eólica 10, por lo tanto, se conoce como una "turbina a barlovento" de eje horizontal. El rotor 12 extrae la energía del viento según gira. Esto provoca una reducción en la velocidad del viento aguas abajo del rotor 12. El área de velocidad de viento reducida comúnmente se denomina como "estela" del rotor 12. La estela se dispersa con el aumento de la distancia desde el rotor 12 y está representada por las líneas discontinuas 26 en la Figura 1. La turbina eólica 10 incluye un mecanismo de guiñada (no mostrado) para hacer girar la góndola 13 alrededor de un eje de guiñada vertical 27 para mantener el rotor 12 orientado hacia el viento con la dirección del viento cambiante.

35 La turbina eólica 10 típicamente incluye un mecanismo de cabeceo (no mostrado) localizado dentro del cubo del rotor 20, para hacer girar o "cabecear" las palas 19a, 19b, 19c alrededor de sus ejes longitudinales 28. Hacer cabecear las palas 19a, 19b, 19c varía el ángulo de ataque (y por tanto la elevación) de las palas 19a, 19b, 19c, lo que permite que la velocidad del rotor se mantenga dentro de límites operativos predefinidos a pesar del cambio en las velocidades del viento. Además de controlar la velocidad del rotor, el cabeceo de pala se usa para suavizar las variaciones en la carga y el par como se describe más adelante.

45 Las palas 19a, 19b, 19c del rotor 12 experimentan velocidades de viento significativamente diferentes en diferentes puntos dentro de un ciclo rotacional, porque la velocidad del viento generalmente varía con la altura. Por ejemplo, la pala que se extiende hacia arriba 19b en la Figura 1 puede experimentar una velocidad del viento más rápida y, por tanto, una mayor elevación, que la pala que se extiende hacia abajo 19a. Para compensar las diferencias en la velocidad del viento con la altura, algunas turbinas modernas emplean "control de cabeceo cíclico" para variar el ángulo de ataque de las palas continuamente durante un ciclo rotacional. Por lo tanto, por ejemplo, el ángulo de ataque de una pala puede aumentar a medida que la pala pasa la torre, para aumentar la elevación generada por una pala que apunta hacia abajo 19a. El cabeceo cíclico asegura que las palas proporcionan sustancialmente la misma elevación en todos los puntos en el ciclo rotacional, de manera que las palas 19a, 19b, 19c se exponen sustancialmente a los mismos momentos de flexión en el sentido del batimiento durante el ciclo de un rotor y la fatiga y cargas extremas en el sistema completo de turbina eólica se reducen.

55 La turbina eólica 10 incluye un sistema de control de turbina eólica que, entre otras cosas, controla los mecanismos de guiñada y cabeceo. El sistema de control de turbina eólica incluye un controlador 29 que recibe señales indicativas de la velocidad del viento desde el anemómetro 17 y la dirección del viento desde la veleta 18, y calcula las variaciones requeridas para la guiñada y cabeceo. Se emplea un modelo que relaciona la variación estimada de la velocidad y dirección del viento con la altura para determinar los parámetros requeridos para el control del cabeceo cíclico basándose en las lecturas de velocidad del viento del anemómetro 17.

65 Aunque los sistemas de control de turbina eólica existentes funcionan bien, hay un afán continuo por producir sistemas de control y estrategias de control más sofisticados. De hecho, un objetivo de la presente invención es proporcionar un sistema de control de turbina eólica más sofisticado que gestione mejor algunos otros desafíos técnicos que se explicarán ahora.

Las palas de las turbinas eólicas modernas son inherentemente flexibles, y pueden flexionarse significativamente durante su uso. Puesto que las palas son largas, por encima de los 50 metros en muchos casos, cualquier flexión o doblado de las palas puede traducirse en un desplazamiento considerable de las puntas de las palas fuera del disco del rotor en la dirección del viento. Para turbinas a barlovento, la carga de viento tenderá a forzar las palas hacia la torre. La flexión de las palas, por tanto, presenta un riesgo de colisión entre las palas y la torre en condiciones extremas. El riesgo es mayor en los casos de cizalladura de viento "negativa", es decir, cuando la velocidad del viento es mayor en la parte inferior del disco del rotor que en la parte superior.

Para evitar que las palas colisionen con la torre, las turbinas eólicas modernas están diseñadas para asegurar que la holgura entre la punta de la pala y la torre, es decir, la distancia "de punta a torre" (representada por la flecha de doble cabeza 30 en la Figura 1), permanece dentro de límites de seguridad predefinidos. Para ello, actualmente se emplean varias medidas:

En primer lugar, las palas 19a, 19b, 19c pueden pre-flexionarse, de manera que se curven desde la torre 11 moviéndose en la dirección de extensión, desde la raíz 21 hasta la punta 22, pero se enderezan cuando están bajo carga. Sin la pre-flexión, las puntas 22 de las palas 19a, 19b, 19c podrían flexionarse indeseablemente cerca de la torre 11 cuando están bajo carga.

En segundo lugar, la góndola 13 y el rotor 12 están inclinados como se muestra en la Figura 1, de manera que un eje de rotor 31 alrededor del cual gira el rotor 12 está inclinado hacia arriba, hacia el viento, con respecto a un eje horizontal 32. La extensión de la inclinación está definida por un "ángulo de inclinación" que es el ángulo entre el eje del rotor 31 y la horizontal 32. La inclinación del rotor 12, por tanto, aumenta la holgura entre la torre 11 y las puntas 22 de las palas 19a, 19b, 19c.

En tercer lugar, las palas 19a, 19b, 19c están inclinadas de forma diédrica en la dirección de extensión que aleja de la torre 11, moviéndose desde la raíz 21 hasta la punta 22. Esto se conoce como "formación de cono" porque las palas barren un área con forma de cono. La extensión de la formación de cono está definida por un "ángulo de cono", que es el ángulo entre el eje longitudinal 28 de las palas 19a, 19b, 19c a lo largo de la dirección de extensión y el disco del rotor 24. Cuando el rotor 12 no está inclinado, el ángulo de cono es simplemente el ángulo entre el eje longitudinal 28 de una pala 19a, 19b, 19c y el eje de guiñada vertical 27 alrededor del cual gira la góndola 13. Debe observarse que la extensión de la formación de cono mostrada en la Figura 1 se ha exagerado en gran medida para mejorar la comprensión de la presente invención.

En cuarto lugar, las palas 19a, 19b, 19c incorporan elementos estructurales para aumentar su rigidez y reducir su propensión a flexionarse hacia la torre 11 en una extensión más allá de lo deseable para compensar cualquier pre-flexión.

Una pre-flexión, inclinación y formación de cono excesivas pueden reducir el rendimiento y, por tanto, reducir la eficiencia de la turbina eólica. Además, una pre-flexión excesiva puede hacer que las palas sean difíciles de fabricar y problemáticas de transportar. Además, aumentar la rigidez de las palas generalmente significa aumentar el peso de las palas y, por tanto, aumentar el tamaño y el peso de otros componentes de la turbina eólica que deben soportar las palas más pesadas. Esto aumenta el coste de la turbina eólica y puede reducir adicionalmente su rendimiento y eficiencia.

El documento US2004/057828 se refiere a una turbina eólica con un sensor que mide la desviación del plano de las palas de la turbina eólica. Los sensores se describen como láser, de ultrasonidos o de radar, y miden la distancia entre las palas y la torre. El documento WO2009/109467 describe estrategias de control redundantes para turbinas eólicas. El documento EP2182205 describe un método para alinear una góndola de turbina eólica con la dirección del viento que se aproxima. El documento WO2011/023774 se refiere a un sistema de adquisición de datos para una turbina eólica con un número de sensores y puntos de conexión.

### Sumario de la invención

De acuerdo con la presente invención, se proporciona una turbina eólica a barlovento que comprende: una torre; un rotor y un dispositivo de detección de presión configurado para detectar la presión del aire y proporcionar una señal indicativa de la presión del aire detectada a un controlador de turbina eólica, para su uso en el control del rotor de la turbina eólica, en el que el dispositivo de detección de presión está soportado por la torre en una localización dentro de la estela del rotor.

Soportar el dispositivo de detección de presión mediante la torre permite que el dispositivo de detección de presión se sitúe dentro de la estela del rotor a un nivel correspondiente a la mitad inferior del disco del rotor. La señal desde el dispositivo de detección de presión puede transformarse en señales indicativas de la velocidad del viento y dirección del viento en la torre, dentro de la estela del rotor, a un nivel correspondiente a la mitad inferior del disco del rotor. Puede aplicarse la filtración y/o corrección adecuada a las señales para retirar efectos turbulentos causados por el rotor para llegar a la velocidad del viento ambiente y dirección del viento en la torre. El conocimiento de estos parámetros permite que puedan emplearse algoritmos de control de rotor más sofisticados.

La presente invención permite que el sistema de control de turbina eólica optimice la potencia diana para la parte inferior del disco de rotor más eficazmente que los sistemas de la técnica anterior. Por ejemplo, en el caso de control del cabeceo cíclico, pueden utilizarse los valores reales de la velocidad del viento y dirección del viento en la mitad inferior del disco del rotor en lugar de las estimaciones derivadas del anemómetro y las mediciones de la veleta en la parte superior de la torre. Finalmente, esto permite que la turbina eólica funcione más eficientemente.

Preferentemente, el dispositivo de detección de presión está al menos tan lejos del eje del rotor como el punto medio longitudinal de una pala. Esto permite que la distancia de punta a torre se supervise a medida que la pala pasa por la torre. Las mediciones de punta a torre más eficaces pueden obtenerse cuando el dispositivo de detección de presión está montado a una altura sustancialmente correspondiente a la altura de la parte más inferior del disco del rotor.

Para una velocidad de viento, velocidad del rotor y ángulo de cabeceo dados, la distancia de punta a torre puede deducirse de la forma de un pulso o cambio brusco de presión en la señal desde el dispositivo de detección de presión. Para ello, el sistema de control de turbina eólica puede acceder a una tabla de consulta, o modelo paramétrico, que almacena correlaciones entre la forma de los picos de presión y la distancia de punta a torre para numerosas combinaciones de velocidad de viento, velocidad de rotor y ángulo de cabeceo.

La distancia de punta a torre puede utilizarse como una restricción en los algoritmos de control de la turbina eólica. Por ejemplo, el sistema de control puede configurarse para mantener la distancia de punta a torre dentro de límites predefinidos. Además, el sistema de control puede configurarse para tomar una acción para aumentar la distancia de punta a torre en el caso de que la distancia de punta a torre se haga demasiado pequeña. Esto puede conseguirse, por ejemplo haciendo cabecear una pala fuera del viento para reducir la elevación cuando esta pasa la torre, o aumentando la velocidad del rotor.

El conocimiento dinámico de la distancia de punta a torre, y la capacidad de ajustarla dinámicamente, si fuera necesario, es particularmente ventajoso porque proporciona más flexibilidad sobre el diseño de las turbinas eólicas.

Las turbinas eólicas de la técnica anterior están diseñadas con márgenes de seguridad estructural altos, para adaptarse a escenarios de "el peor de los casos" de flexión extrema de la pala. Como los escenarios del peor de los casos son intrínsecamente raros, el rendimiento y eficiencia de las turbinas eólicas de la técnica anterior están comprometidos para la mayor parte de la vida útil de la turbina eólica. A diferencia de esto, supervisando dinámicamente la distancia de punta a torre y teniendo la capacidad de ajustarla dinámicamente si se requiere, la presente invención permite que se puedan emplear márgenes de seguridad estructural más pequeños. Por ejemplo, las turbinas eólicas de acuerdo con la presente invención pueden tener palas más ligeras, más finas y flexibles, con menos formación de cono (ángulos de cono más pequeños) y menos inclinación del rotor que las turbinas eólicas de la técnica anterior. Esto da como resultado un rendimiento energético mejorado y significa que la energía puede generarse a un menor coste. Por tanto, el rendimiento y eficiencia de la turbina eólica pueden optimizarse para la mayor parte de la vida útil de la turbina eólica, mientras aún proporcionan protecciones robustas en el caso de escenarios del peor de los casos. La provisión de palas más ligeras da como resultado también un ahorro significativo en términos de costes de producción. Además, pueden usarse palas más rectas (es decir, con menor pre-flexión), que son más fáciles de fabricar y transportar.

El dispositivo de detección de presión puede incluir un sensor en forma de manómetro. Los manómetros baratos que son robustos y que no requieren mantenimiento regular están fácilmente disponibles en fabricantes tales como Kulite™ y Honeywell/Sensotec™. Sin embargo, el sensor puede reemplazarse y recalibrarse, si fuera necesario, como parte de una visita de mantenimiento programada.

El sensor puede montarse en la torre dentro de un orificio que penetra en la pared de la torre. El sensor puede estar configurado para medir el diferencial de presión dinámica del aire en la superficie externa de la torre respecto a la presión de aire estática dentro de la torre. De esta manera, la torre de la turbina eólica realiza el trabajo de un tubo de pitot. Como alternativa, el sensor puede montarse directamente en la superficie exterior de la torre y configurarse para medir la presión de aire absoluta. En cada caso, el sensor de presión puede montarse de manera que el punto de medición esté separado de la superficie exterior de la torre. Por ejemplo, el sensor puede localizarse en una cuna montada en la superficie exterior.

Preferentemente, el dispositivo de detección de presión incluye cuatro o más sensores. Se requieren cuatro o más sensores para medir la dirección del viento de forma fiable. Los sensores pueden disponerse a intervalos alrededor de la circunferencia de la torre. Preferentemente, los sensores están separados uniformemente alrededor de la circunferencia. Más preferentemente, se usa un conjunto de 12-25 sensores. Proporcionar un mayor número de sensores mejora la resolución de las mediciones y permite que las curvas de presión medidas se ajusten con mayor precisión frente a las curvas de presión patrón, por ejemplo en la determinación de la distancia de punta a torre como se ha descrito anteriormente. Un mayor número de sensores consigue también un grado de redundancia en el sistema, de manera que el sistema pueda seguir funcionando eficazmente si uno o más sensores desarrollan un fallo.

Los sensores pueden estar todos localizados sustancialmente a la misma altura. Como alternativa, los sensores pueden estar localizados a múltiples alturas en la torre. Por ejemplo, puede haber dos o más sensores, o series de sensores, en relación verticalmente separada. Esto permite que la velocidad del viento y la dirección del viento se determinen en múltiples elevaciones a lo largo de la torre, si fuera necesario.

5 La turbina eólica puede incluir un dispositivo de supervisión para supervisar la velocidad del viento y/o la dirección del viento. El dispositivo de supervisión puede disponerse en una relación verticalmente separada con el dispositivo de detección de presión, de manera que el sistema de control de turbina eólica pueda supervisar la velocidad del viento y/o la dirección del viento en múltiples elevaciones. El dispositivo de supervisión preferentemente está  
10 localizado dentro de la estela del rotor a un nivel correspondiente a la mitad superior del disco del rotor. En consecuencia, el controlador de la turbina eólica puede optimizar el rendimiento de las mitades superior e inferior del disco del rotor independientemente. El dispositivo de supervisión puede montarse por encima de la torre, por ejemplo en la góndola. El dispositivo de supervisión puede incluir un anemómetro y/o una veleta, tal como el dispositivo convencional descrito anteriormente a modo de antecedentes. El sistema de control de turbina eólica, por  
15 lo tanto, puede complementar los algoritmos de control existentes con señales desde el dispositivo de detección de presión para conseguir un control más sofisticado de la turbina eólica.

Además de variar la velocidad del viento con la altura, como se ha descrito anteriormente, la dirección del viento puede variar también o "torcerse" con la altura. Al tener dispositivos de supervisión del viento en relación  
20 verticalmente separada, estas variaciones en la dirección del viento pueden supervisarse y la guiñada del rotor y el cabeceo de las palas pueden ajustarse en consecuencia para un rendimiento óptimo.

Se apreciará que el concepto inventivo incluye una turbina eólica a barlovento que comprende: una torre; un rotor y un primer y segundo dispositivos de supervisión de viento en relación verticalmente separada. El primer y segundo  
25 dispositivos de supervisión del viento preferentemente están dispuestos para supervisar la velocidad del viento y/o la dirección del viento. El primer dispositivo de supervisión del viento puede ser un dispositivo convencional, por ejemplo un anemómetro y/o una veleta, y preferentemente está localizado dentro de la estela del rotor a un nivel correspondiente a la mitad superior del disco del rotor. El segundo dispositivo de supervisión del viento preferentemente es un dispositivo de detección de presión, tal como se ha descrito anteriormente, que  
30 preferentemente está soportado por la torre. El segundo dispositivo de supervisión de viento preferentemente está dispuesto dentro de la estela del rotor a un nivel correspondiente a la mitad inferior del disco del rotor.

El concepto inventivo incluye también un sistema de control de turbina eólica para controlar una turbina eólica que tiene una torre y un rotor, en el que el sistema de control de turbina eólica incluye un controlador de turbina eólica configurado para recibir una señal desde un dispositivo de detección de presión soportado por la torre en una  
35 localización dentro de la estela del rotor y para utilizar la señal para controlar el rotor.

El controlador de turbina eólica puede configurarse para determinar la distancia hasta un punto a lo largo de una pala, a medida que la pala pasa la torre, es decir, la holgura entre la pala y la torre. Además, el controlador puede configurarse para controlar el rotor de acuerdo con una restricción basándose en dicha holgura. Preferentemente, el  
40 punto a lo largo de la pala está en o cerca de la punta de la pala. De esta manera, el controlador está configurado para determinar la distancia de punta a torre.

El controlador puede configurarse para tomar una acción de aumentar la holgura entre las palas y la torre si esta holgura se aproxima o cae por debajo de un valor mínimo predefinido, o si la probabilidad de una colisión entre una  
45 pala y la torre supera un valor aceptable máximo predeterminado. Por ejemplo, el controlador puede estar configurado para introducir o variar un patrón de cabeceo cíclico para reducir la elevación generada por la parte inferior del disco del rotor.

50 La invención puede expresarse también en términos de un método para controlar una turbina eólica que tiene una torre y un rotor, comprendiendo el método detectar una presión de aire dentro de la estela del rotor a un nivel donde la estela choca con la torre, y controlar el rotor basándose en la presión de aire detectada.

La Solicitud de Patente Internacional (PCT) WO 2008/129112 describe sensores montados en la torre. Sin embargo, estos sensores están situados fuera de la estela del rotor y, por tanto, no pueden detectar los cambios bruscos de presión a medida que las palas pasan la torre o la presión de aire dentro de la parte inferior del disco del rotor. Además, los sensores no miden directamente la velocidad y dirección del viento que choca con la parte inferior del disco de rotor. En tal caso, estos sensores no son adecuados para determinar la distancia de punta a torre o para su  
60 uso en controlar el rotor.

### Breve descripción de los dibujos

Las Figuras 1 y 1A que son, respectivamente, vistas esquemáticas lateral y frontal de una turbina eólica de la técnica anterior, ya se han descrito anteriormente a modo de antecedentes de la invención.

65 Para que la invención pueda entenderse más fácilmente, se hará referencia ahora, a modo de ejemplo únicamente,

a los siguientes dibujos, en los que:

La Figura 2 es una vista lateral esquemática de una turbina eólica de acuerdo con la presente invención, en la cual un conjunto de sensores está montado en la torre de la turbina eólica para medir la presión de aire en la torre;

La Figura 3 es una sección transversal esquemática a través de la torre de la turbina eólica tomada a lo largo de la línea A-A en las Figuras 2 y 4, y que muestra el conjunto de sensores distribuidos alrededor de la circunferencia externa de la torre;

La Figura 4 es una vista frontal esquemática de la turbina eólica de la Figura 2;

La Figura 5 es una representación de la presión frente al tiempo, que ilustra el efecto de la distancia de punta a torre sobre las señales de presión desde los sensores; y

La Figura 6 es un diagrama de bloques que representa cómo se usan las señales de los sensores para controlar la turbina eólica de la presente invención.

### Descripción detallada

La Figura 2 muestra una turbina eólica a barlovento de eje horizontal 100 que comprende una torre tubular 102 que soporta una góndola 104 en su extremo superior 106. La góndola 104, a su vez, soporta un rotor 108, que incluye tres palas de rotor separadas equitativamente 110a, 110b, 110c que se extienden radialmente desde un cubo central 112 cuando se observan desde la parte delantera, como se muestra en la Figura 4. De nuevo, se muestran solo dos palas 110a, 110b en la vista lateral de la Figura 2. Un dispositivo de supervisión de viento 114 que incluye un anemómetro 115 y una veleta 116 está montado encima de la góndola 104. El anemómetro 115 supervisa la velocidad del viento, mientras la veleta 116 supervisa la dirección del viento por encima de la torre 102 dentro de la estela 117 (Figura 2) del rotor 108, correspondiente a una mitad superior del disco del rotor 118. La mitad superior del disco del rotor 118 es la región semicircular 119 por encima de la línea discontinua horizontal 120 en la Figura 4.

Un dispositivo de detección de presión 121 que comprende una serie de sensores 122 está dispuesto en una superficie externa 124 de la torre tubular 102 dentro de la estela 117 del rotor 108 correspondiente a la mitad inferior del disco del rotor 118. La mitad inferior del disco del rotor 118 es la región semicircular 126 por debajo de la línea discontinua horizontal 120 en la Figura 4. En este ejemplo, hay dieciséis sensores 122 que están separados sustancialmente de forma equiangular alrededor de la circunferencia de la torre 102, como se muestra en la Figura 3. Cada sensor 122 comprende un manómetro montado dentro de un orificio respectivo 128 en la pared externa 130 de la torre 102. Los manómetros están configurados para medir la presión de aire dinámica en la superficie externa 124 de la torre 102 respecto a la presión de aire estática del aire 132 dentro de la torre 102. De esta manera, la torre de la turbina eólica 102 realiza el trabajo de un tubo de pitot.

Haciendo referencia a la Figura 4, los sensores 122 están dispuestos al nivel vertical del punto más bajo del disco del rotor 118. La altura de los sensores 122 está representada esquemáticamente en las Figuras 2 y 4 por la flecha de doble cabeza 134, que se extiende verticalmente entre el suelo 136 y la línea horizontal A-A 138 a través de la torre 102.

Haciendo referencia de nuevo a la Figura 2, los sensores 122 forman parte de un sistema de control de turbina eólica. El sistema de control de turbina eólica incluye un controlador de turbina eólica 140, que está configurado para controlar el rotor 108 y otras operaciones de la turbina eólica 100. El controlador de turbina eólica 140 recibe señales desde el anemómetro 115 y la veleta 116, que son indicativas de la velocidad del viento y la dirección del viento en la parte superior de la torre 102. El controlador 140 recibe también señales que representan la presión de los dieciséis sensores 122; estas señales son indicativas de la velocidad del viento en la superficie de la torre 124 en las diversas localizaciones de los sensores 122 respectivos. El controlador 140 es capaz de calcular la velocidad del viento y la dirección del viento en la superficie de la torre 124, comparando las señales desde los diversos sensores 122 alrededor de la circunferencia de la torre 102.

El controlador de turbina eólica 140 también está configurado para determinar la distancia de punta a torre basándose en las señales recibidas desde los sensores 122. La distancia de punta a torre está representada esquemáticamente por la flecha de doble cabeza 142 en la Figura 2, que se extiende sustancialmente de forma horizontal entre la punta 144 de la pala dirigida hacia abajo 110a y la superficie externa 124 de la torre 102. El método de determinar la distancia de punta a torre 142 se describirá ahora con referencia a las Figuras 5 y 6.

Haciendo referencia en primer lugar al cuadro A en la Figura 6, este contiene una representación de la presión frente al tiempo, e incluye tres líneas 146a, 146b, 146c que son esquemáticamente representativas de las señales de presión dinámica medidas por tres de los sensores montados en la torre. Para cálculos de punta a torre, son las señales de los sensores 122 montados en el lateral de la torre 102 orientados hacia las palas 110a, 110b, 110c las que son de mayor relevancia. Las representaciones de presión dinámica 146a, 146b, 146c son registradas por el

sistema de control de la turbina eólica e incluyen una serie de picos de presión local, uno de los cuales está indicado por el número de referencia 148 en el cuadro A. Cada pico corresponde a un cambio brusco en la presión a medida que una pala pasa la torre.

5 La distancia de punta a torre 142 (Figura 2) puede deducirse de la forma y amplitud de estos picos de presión 148. En general, a medida que disminuye la distancia de punta a torre 142, los picos de presión medidos 148 serán más afilados y tendrán una mayor amplitud.

10 Por lo tanto, se detectan picos de presión relativamente anchos de baja amplitud para distancias de punta a torre relativamente grandes, mientras que se detectan picos relativamente estrechos de alta amplitud para distancias de punta a torre relativamente pequeñas.

15 Este principio se ilustra en la Figura 5, en la cual la línea continua 149 representa esquemáticamente un pico de presión 150 medido para una distancia de punta a torre relativamente pequeña, mientras que la línea discontinua 151 representa esquemáticamente un pico de presión 152 medido para una distancia de punta a torre relativamente grande. El pico 150 de la línea continua 149 tiene una mayor amplitud y es más estrecho que el pico 152 correspondiente de la línea discontinua 151. En este ejemplo, la anchura o duración de los picos 150, 152 puede compararse comparando la "anchura a media altura" (FWHM) de los picos, como se indica por las flechas de doble cabeza 153, 154 en la Figura 5. La FWHM 153 de la línea continua 149 es menor que la FWHM 154 de la línea discontinua 151.

20 Además de la distancia de punta a torre 142, la forma de un pico de presión también se ve afectada por otros factores, incluyendo la velocidad del viento, la velocidad del rotor y el ángulo de cabeceo. El controlador de la turbina eólica 140 accede a un modelo paramétrico que almacena correlaciones entre la forma de los picos de presión (por ejemplo amplitud y FWHM) y la distancia de punta a torre 142 para numerosas combinaciones de velocidad del rotor, ángulo de cabeceo y la velocidad del viento en la torre 102 medida por la serie de sensores 122. El modelo paramétrico se almacena en una base de datos que es parte del sistema de control de la turbina eólica.

25 La distancia de punta a torre 142 se obtiene a partir del modelo paramétrico conociendo la amplitud y la FWHM de un pico de presión, y conociendo la velocidad del rotor y el ángulo de cabeceo, que son parámetros convencionales supervisados por el sistema de control de la turbina eólica. La dirección del viento puede afectar también la amplitud de los picos de presión. Por lo tanto, en otras realizaciones de la invención, el modelo paramétrico puede almacenar también correlaciones entre la forma de los picos de presión y la dirección del viento en la torre 102 medida por la serie de sensores 122.

30 Las señales desde los sensores montados en la torre 122 se emplean para aumentar la sofisticación del control de la turbina eólica, como se describe a continuación con referencia a la Figura 6.

35 La Figura 6 incluye dos hilos: el primer hilo, a la izquierda de la Figura 6, representa la entrada del sensor "convencional", es decir, los parámetros convencionales que supervisan los sensores existentes en un sistema de control de turbina eólica conocido típico, mientras que el segundo hilo, a la derecha de la Figura 6, representa las señales adicionales desde los sensores montados en la torre 122. Se enumeran ejemplos de parámetros convencionales que se supervisan en los sistemas de control de turbina eólica existentes en el cuadro C. Estos parámetros típicamente pueden incluir la velocidad del viento y la dirección del viento en la góndola (supervisada por el anemómetro); la velocidad del rotor; los momentos de flexión de la pala (supervisados por los sensores montados en la pala); las posiciones de guiñada y del rotor; y la potencia generada por la turbina eólica. Las señales indicativas de estos parámetros se envían desde los diversos sensores convencionales hasta el controlador de turbina eólica (cuadro D).

40 Además de las señales convencionales, el controlador 140 recibe señales indicativas de la velocidad del viento y la dirección del viento en la torre 102, y puede recibir además lecturas de la distancia de punta a torre 142 (Cuadro E). Estas señales se obtienen a partir de los sensores montados en la torre 122. Sin embargo, puesto que estos sensores son operativos en la estela 117 del rotor 108, las lecturas de presión reales (Cuadro A) desde estos sensores 122 incluirán algunos los efectos de inestabilidad y turbulencia provocados por las palas 110a, 110b, 110c. Estas señales se filtran y/o corrigen (Cuadro B) para retirar los efectos turbulentos para obtener la velocidad del viento ambiente y la dirección del viento en la torre 102. Las técnicas de filtración y corrección adecuadas para este fin serán fácilmente evidentes para el experto en la materia, y se emplean en sistemas de control de turbina eólica existentes para filtrar señales del anemómetro 115, que también funciona en la estela 117 del rotor 108.

45 El controlador de turbina eólica 140 utiliza las señales filtradas de los sensores montados en la torre 122, junto con las señales convencionales (Cuadro C), para controlar el rotor para proporcionar potencia óptima dentro de restricciones de carga predefinidas. Para ello, por ejemplo, el sistema de control de turbina eólica puede variar dinámicamente el cabeceo de las palas, la velocidad del rotor, y/o los ángulos de las aletas, si se proporcionan aletas en las palas.

65

Las señales de los sensores montados en la torre 122 permiten que el rotor 108 se controle dentro de una restricción de punta a torre. La información sobre velocidad y dirección del viento desde los sensores de presión 122 en la torre 102 puede usarse con la otra información del sensor en el controlador 140 para predecir valores promedio y variabilidad para desviaciones de la pala hacia la torre 102. Las lecturas para la distancia real entre las palas 110a, 110b, 110c y la torre 102 cada vez que una pala pasa la torre 102, pueden usarse junto con las predicciones para determinar valores precisos de la variabilidad real de las desviaciones de la pala y, por tanto, la probabilidad de una futura colisión pala/torre.

Si la distancia de punta a torre 142 se hace demasiado pequeña, entonces la probabilidad de que una pala colisione con la torre 102 se hace demasiado alta. En tales circunstancias, el sistema de control de turbina eólica puede tomar la acción de aumentar la distancia de punta a torre 142. Por ejemplo, el ajuste de potencia diana para la turbina eólica 100 puede reducirse, puede introducirse una estrategia de cabeceo individual para cada pala o una estrategia de cabeceo cíclico o si, ya se ha introducido, esta puede adaptarse, para reducir la elevación de las palas 110a, 110b, 110c en la mitad inferior del disco del rotor 118. Las probabilidades permisibles máximas típicas para golpear la torre pueden establecerse de acuerdo con la norma bien establecida de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 61400-1, turbinas eólicas, Parte 1: requisitos de diseño.

A medida que se supervisa la distancia de punta a torre 142 dinámicamente, y puede tomarse una acción para aumentar la distancia de punta a torre 142 si se requiere, no es necesario comprometer el rendimiento de la turbina eólica 100 introduciendo elementos estructurales para protección contra las colisiones pala-torre. De esta manera, la presente invención permite construir turbinas eólicas con una inclinación de rotor, formación de cono y pre-flexión de la pala reducidas. De esta manera, la turbina eólica 100 de la presente invención mostrada en la Figura 2 tiene un ángulo de inclinación más pequeño (el ángulo entre el eje del rotor 156 y la horizontal 158) y un ángulo de cono más pequeño (el ángulo entre los ejes longitudinales 160 de las palas 110a, 110b, 110c a lo largo de la dirección de extensión y el disco del rotor 118) que la turbina eólica de la técnica anterior mostrada en la Figura 1. Esto mejora el rendimiento y eficiencia de la turbina eólica 100. La presente invención permite también usar palas más ligeras, más flexibles, que son menos caras y más fáciles de fabricar y transportar.

Se apreciará que pueden hacerse diversas modificaciones a los ejemplos descritos anteriormente sin alejarse del alcance de la invención como se define por las reivindicaciones adjuntas. Por ejemplo, se apreciará que los sensores 122 pueden estar localizados a una altura distinta de la mostrada en la Figura 2. Siempre que puedan detectarse los cambios bruscos de presión cuando las palas pasan por la torre, la distancia de punta a torre 142 puede deducirse. Asimismo, aunque los sensores 122 en la Figura 2 están todos localizados a la misma altura, se apreciará que los sensores pueden estar separados verticalmente en otras realizaciones para medir la presión, y por tanto, la velocidad del viento y la dirección del viento, en múltiples elevaciones hacia arriba de la torre 102. Esto permite conseguir un control aún más sofisticado del rotor 108. Además, se apreciará que pueden emplearse otros tipos de sensores para determinar la distancia de punta a torre, por ejemplo los sensores de distancia basados en principios acústicos u ópticos.



**REIVINDICACIONES**

1. Una turbina eólica a barlovento (100) que comprende:
  - 5 una torre (102);  
un rotor (108); y caracterizada por  
un dispositivo de detección de presión (121) configurado para detectar la presión del aire y proporcionar una  
señal indicativa de la presión del aire detectada a un controlador de turbina eólica (140) para su uso en el control del  
rotor de la turbina eólica, en el que el dispositivo de detección de presión está soportado por la torre en una  
10 localización dentro de la estela (117) del rotor (108).
  2. La turbina eólica a barlovento (100) de la reivindicación 1, en la que el dispositivo de detección de presión está  
localizado dentro de la estela (117) del rotor (108), a un nivel correspondiente a la mitad inferior de un disco de rotor  
(118) definido por la rotación del rotor.
  - 15 3. La turbina eólica a barlovento (100) de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en la que el dispositivo de  
detección de presión (121) está al menos tan lejos de un eje del rotor (31) como un punto medio longitudinal de una  
pala de rotor (110).
  - 20 4. La turbina eólica a barlovento (100) de cualquier reivindicación anterior, en la que el dispositivo de detección de  
presión (121) está montado a una altura sustancialmente correspondiente a la altura del punto más bajo de un disco  
de rotor (118) definido por la rotación del rotor (108).
  - 25 5. La turbina eólica a barlovento (100) de cualquier reivindicación anterior, en la que el dispositivo de detección de  
presión (121) incluye una pluralidad de sensores (122).
  6. La turbina eólica a barlovento (100) de la reivindicación 5, en la que los sensores (122) están distribuidos  
alrededor de la circunferencia de la torre (102).
  - 30 7. La turbina eólica a barlovento (100) de la reivindicación 5 o la reivindicación 6, en la que dos o más sensores  
(122) están separados verticalmente.
  8. La turbina eólica a barlovento (100) de cualquier reivindicación anterior, que comprende además un dispositivo de  
supervisión (114) para supervisar la velocidad del viento y/o la dirección del viento, estando el dispositivo de  
35 supervisión separado verticalmente del dispositivo de detección de presión (121).
  9. La turbina eólica a barlovento (100) de la reivindicación 8, en la que el dispositivo de supervisión (114) está  
localizado dentro de la estela (117) del rotor (108) a un nivel correspondiente a una mitad superior de un disco de  
rotor (118) definido por la rotación del rotor.
  - 40 10. Un método para controlar una turbina eólica que tiene una torre (102) y un rotor (108), caracterizado por que el  
método comprende detectar la presión de aire dentro de la estela (117) del rotor a un nivel donde la estela choca  
con la torre, y controlar el rotor basándose en la presión de aire detectada.
  - 45 11. El método de la reivindicación 10, que comprende además controlar el rotor (108) basándose en la velocidad del  
viento y/o la dirección del viento dentro de la estela (117) del rotor a un nivel correspondiente a una mitad superior  
del disco del rotor (118).
  - 50 12. El método de la reivindicación 10 o la reivindicación 11, que comprende además determinar la holgura entre la  
torre (102) y un punto a lo largo de una pala de rotor (110), por ejemplo la punta de una pala, a medida que la pala  
pasa la torre.
  13. El método de la reivindicación 12, que comprende además supervisar los cambios bruscos en la presión  
55 detectada a medida que una pala (110) pasa la torre (102) y deducir la holgura a partir de las características  
asociadas con dichos cambios bruscos.
  14. El método de la reivindicación 12 o la reivindicación 13, que comprende además aumentar la holgura en el caso  
de que esta se aproxime o caiga por debajo de un valor mínimo predefinido, o si la probabilidad de una colisión entre  
una pala (110) y la torre (102) supera un valor máximo aceptable predeterminado.
  - 60 15. El método de cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, que comprende además introducir o variar un patrón de  
cabeceo cíclico de las palas del rotor (110) para reducir la elevación generada en la parte inferior del disco de rotor  
(118), en el caso de que la holgura se aproxime o caiga por debajo de un valor mínimo predefinido, o si la  
probabilidad de una colisión entre una pala y la torre (102) supera un valor máximo aceptable predeterminado.
  - 65 16. Un sistema de control de turbina eólica para controlar una turbina eólica (100), estando configurado el sistema

de control para llevar a cabo el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 10 a 15.

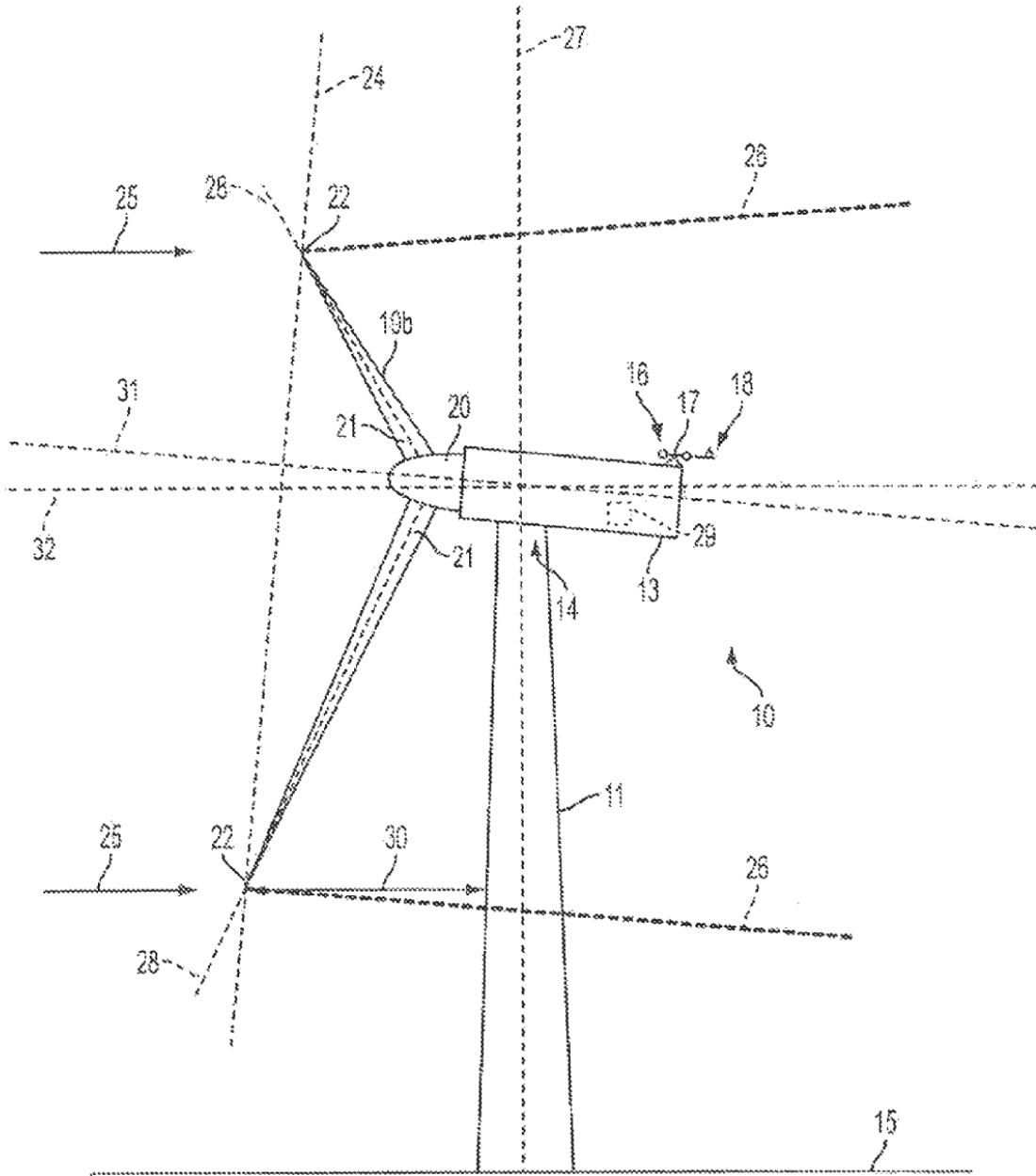


FIG. 1

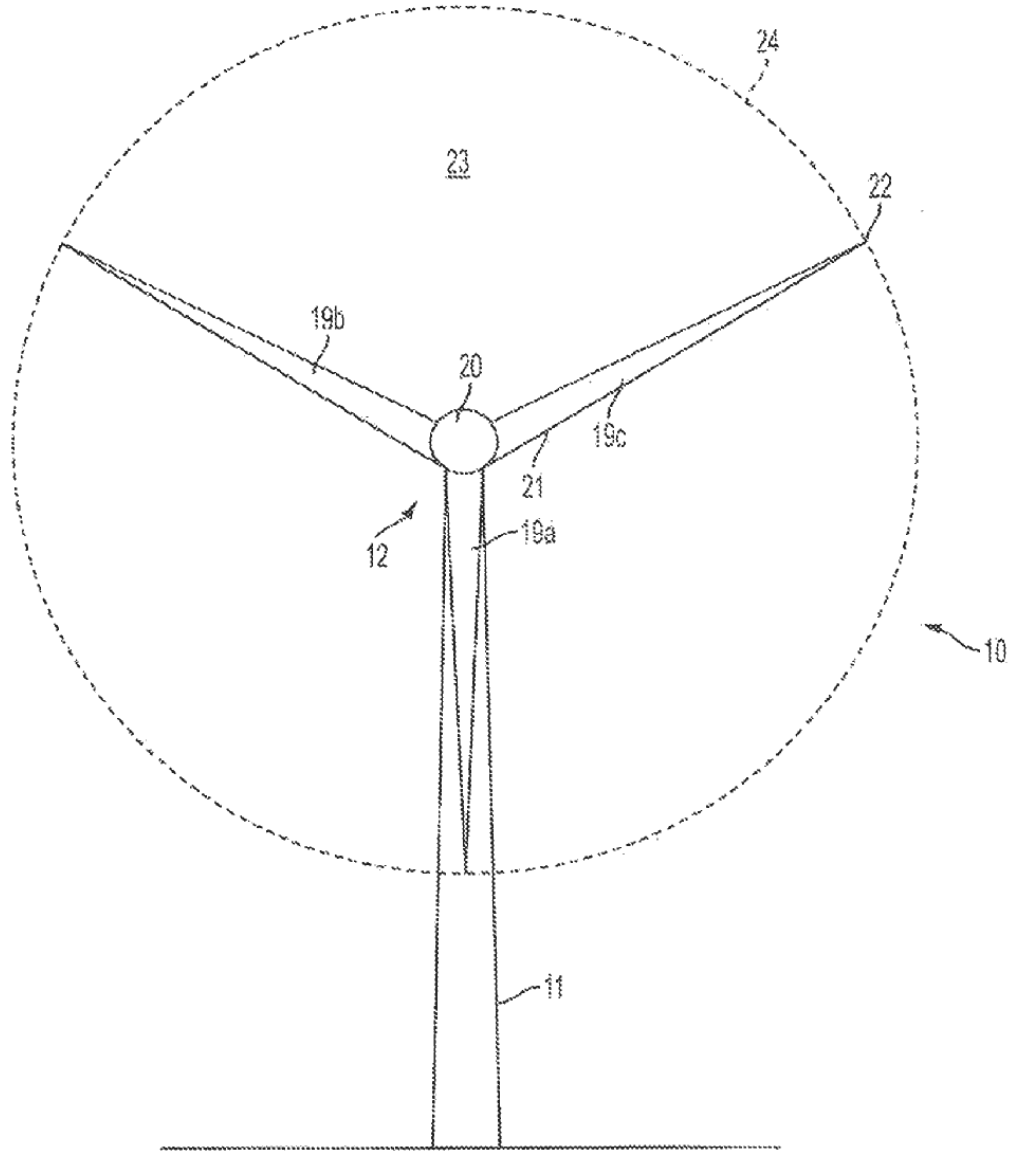


FIG. 1A

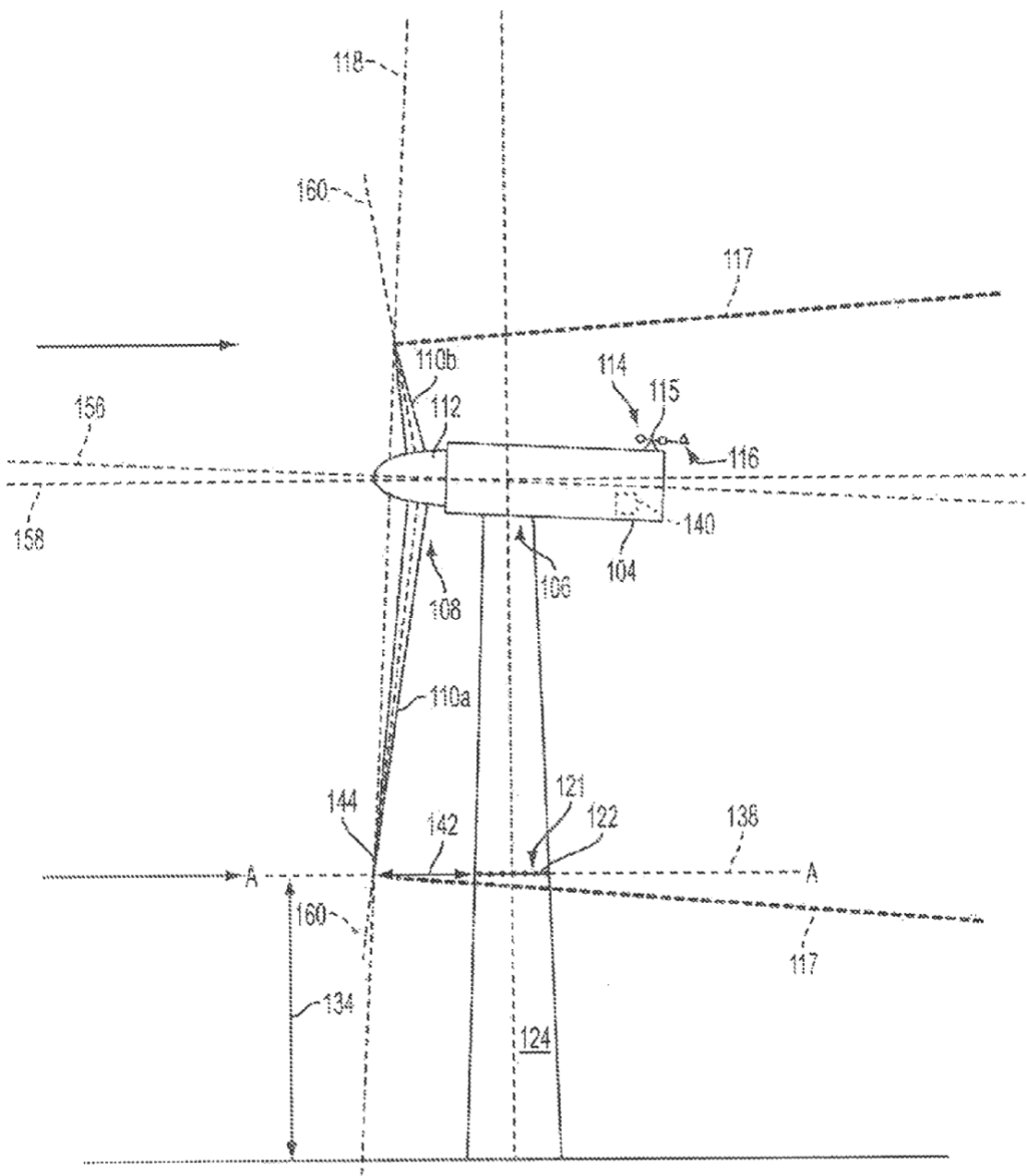


FIG. 2

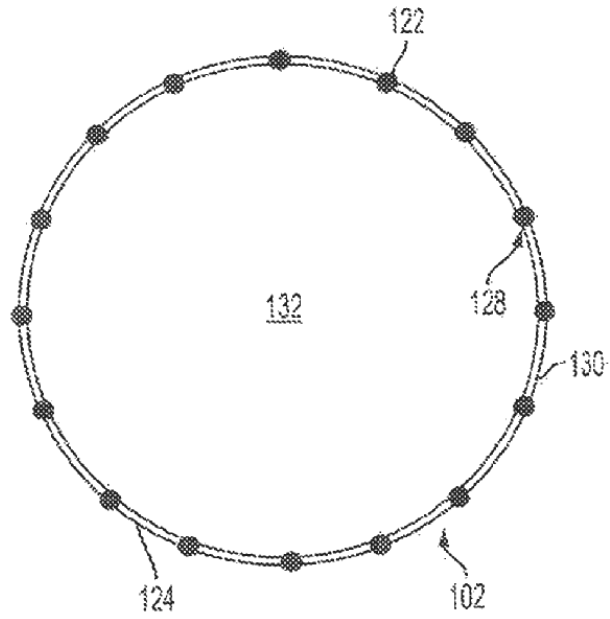


FIG. 3

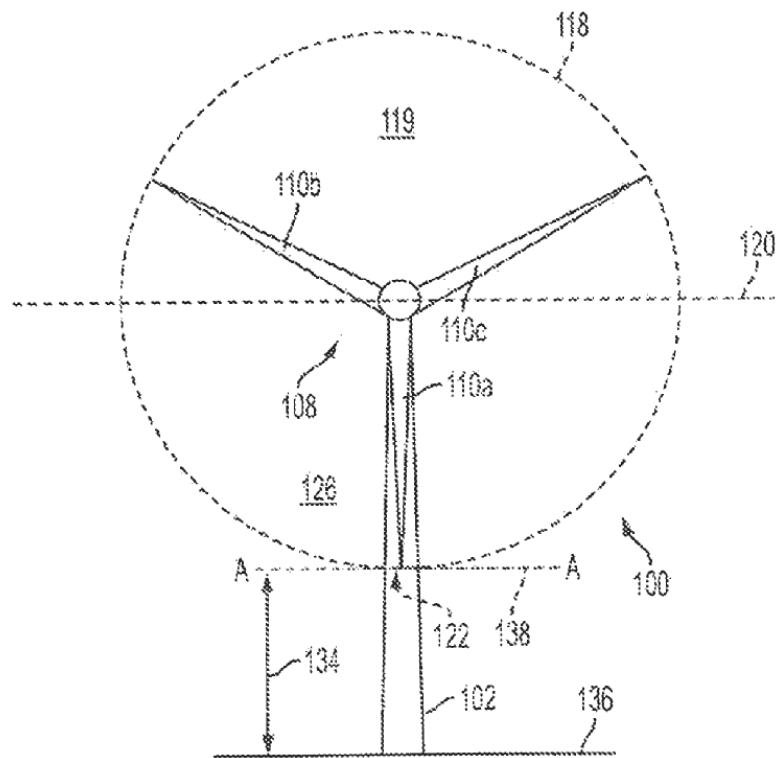


FIG. 4

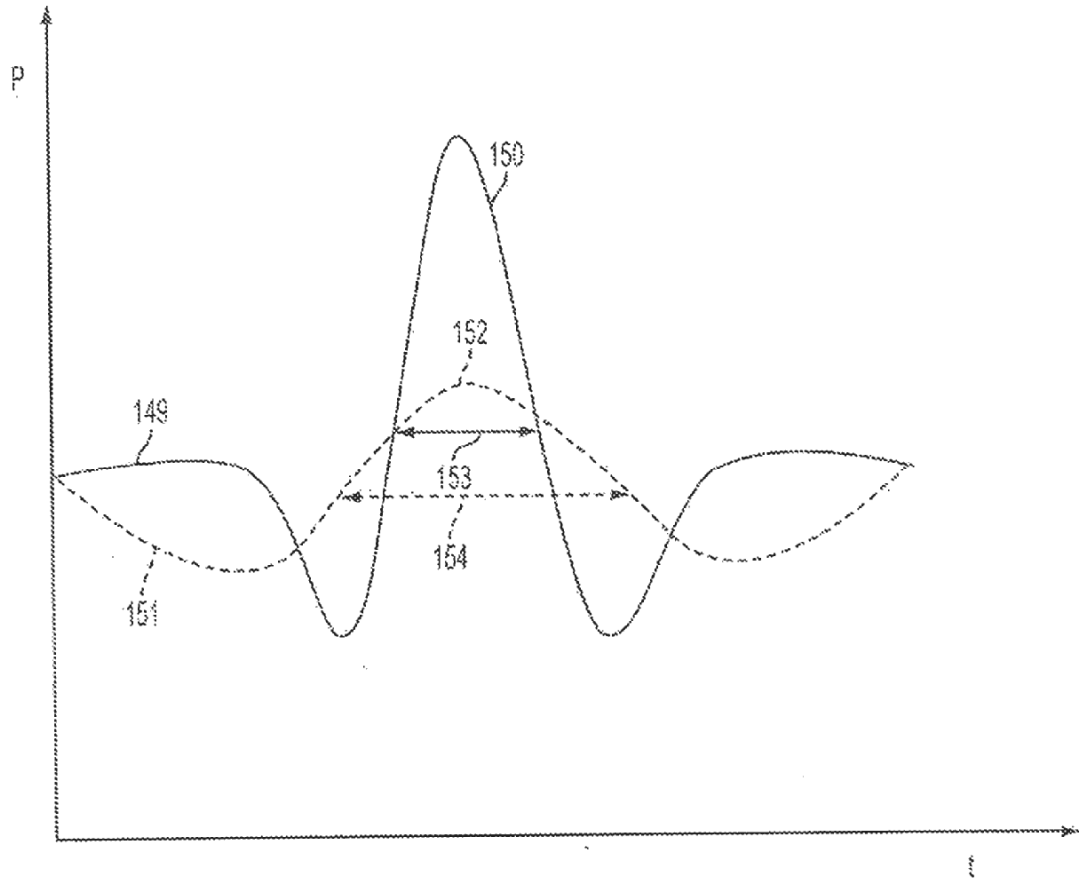


FIG. 5

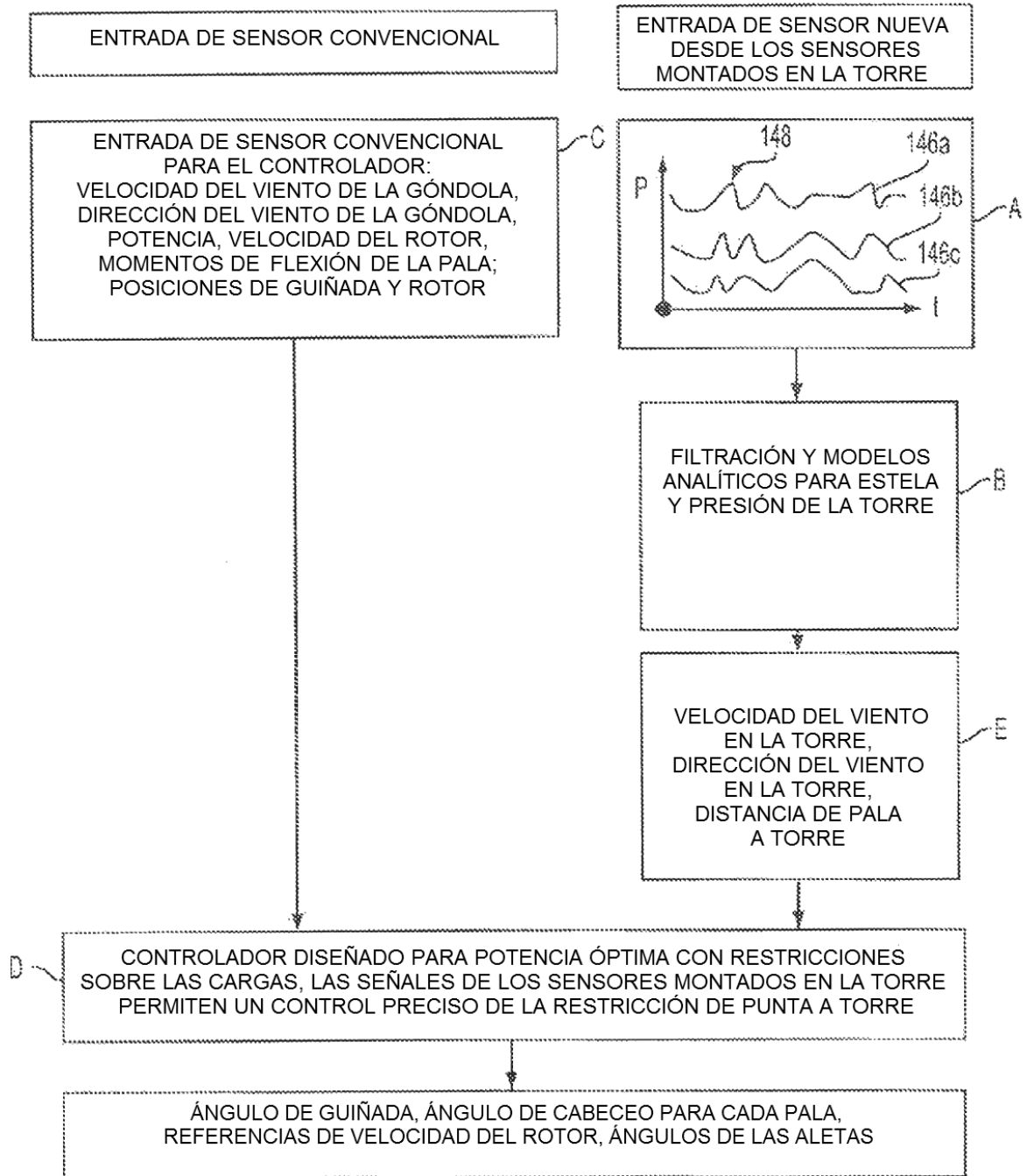


FIG. 6