

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 822 571**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

G01P 5/165 (2006.01)

G01P 13/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.04.2012 E 12164476 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.07.2020 EP 2653722**

54 Título: **Sensor de error de guiñada, turbina eólica y ajuste de ángulo de guiñada**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
04.05.2021

73 Titular/es:

**SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY A/S
(100.0%)
Borupvej 16
7330 Brande, DK**

72 Inventor/es:

**ANDERSEN, JIMMI;
CHRISTIANSEN, PER MOELHAVE y
RIEPER, JOHNNY**

74 Agente/Representante:

LOZANO GANDIA, José

ES 2 822 571 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

Sensor de error de guiñada, turbina eólica y ajuste de ángulo de guiñada

5 La invención describe un sensor de detección de error de guiñada, una turbina eólica de un tipo de eje horizontal que comprende un sensor y un procedimiento para ajustar un ángulo de guiñada de una turbina eólica. La invención describe además el uso de un tubo de Pitot para detectar un error de ángulo de guiñada.

10 Las turbinas eólicas se usan ampliamente para generar energía eléctrica. Para una mejor eficacia, es importante que la góndola de la turbina eólica y el buje de la turbina eólica estén orientados hacia la dirección del viento. Se conoce el uso de actuadores de controlador para girar la góndola de la turbina eólica junto con el rotor de la turbina para ajustar una posición de guiñada óptima. Una posición óptima de guiñada de la turbina optimizará la producción de energía. La pérdida de potencia debido a un error de guiñada es de aproximadamente $1 - \cos^2 \alpha$, donde α es el error de guiñada. Esto significa que 10° de error de guiñada pueden dar como resultado una pérdida de potencia del 1,5 %. Una posición óptima de guiñada de la turbina reducirá aún más la carga en las palas.

15 Es conocido que se mide la dirección del viento con un sensor de dirección del viento, por ejemplo, una veleta, en un punto de la góndola situado detrás del rotor. Un problema con la medición de la dirección del viento en la parte superior de la góndola es el remolino creado por el rotor. El remolino provoca errores en la medición de la dirección del viento. Además de la inexactitud debida al remolino, el ángulo de inclinación y la geometría de la góndola tienen un impacto en la dirección del viento medida. El documento EP 1 559 910 A1 intenta compensar la turbulencia detrás del plano del rotor usando dos anemómetros de copa, uno a cada lado de la góndola. Otros enfoques del problema consideran ubicar diversos tipos de sensores frente al plano del rotor. Por ejemplo, el documento EP 2 048 507 A2 usa una serie de sensores, tal como anemómetros de hélice, anemómetros sónicos o anemómetros de presión montados en un brazo (que puede tener hasta 10 m de longitud) que se extiende hacia afuera desde el cono de punta o el buje de la turbina eólica. El documento WO 2005/093435 A1 considera el uso de varios sensores sónicos 1D dispuestos en la parte delantera del buje para medir la presión de la superficie, y también sugiere el uso de un sensor de presión montado en un brazo para medir la presión atmosférica a una distancia hacia afuera del buje. El documento EP 1 288 494 A1 describe una complicada disposición de montaje de buje para un aparato sensor que comprende tres sensores de tubo de Pitot, de modo que el aparato por sí mismo permanece estacionario mientras gira el buje. Sin embargo, las disposiciones conocidas son de construcción relativamente compleja y, a menudo, comprenden componentes tales como hélices o brazos largos que son propensos a dañarse o fallar, de modo que muchas de las soluciones conocidas también son bastante poco fiables.

20 Por lo tanto, un objeto de la invención es proporcionar un sensor de detección de error de guiñada con una exactitud mejorada.

25 El objeto de la invención se consigue mediante un sensor de detección de error de guiñada de acuerdo con la reivindicación 1, y mediante la turbina eólica de la reivindicación 10. El objeto de la invención se consigue además mediante un procedimiento para ajustar un ángulo de guiñada de la turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 12.

30 La invención proporciona un sensor de detección de error de guiñada que está adaptado para montarse en el lado frontal de un buje de una turbina eólica de un tipo de eje horizontal. El sensor montado en el lado frontal del buje puede medir la velocidad del viento y/o la presión de estancamiento sin verse obstaculizado por el remolino producido por las palas del rotor. El sensor montado está adaptado para medir una presión de estancamiento y/o una velocidad del viento en dos posiciones diferentes a lo largo de un plano horizontal del buje y se caracteriza por que el sensor de detección de error de guiñada comprende un tubo de Pitot con un puerto de presión de estancamiento y un puerto de presión dinámica situado a un lado del tubo de Pitot. Mediante la medición en dos posiciones diferentes, la dirección del viento se puede determinar a partir de las velocidades del viento o las presiones de estancamiento medidas.

35 Una turbina eólica tendrá la misma velocidad del viento en ambas posiciones del sensor de detección de error de guiñada si el buje de la turbina eólica se dirige con el ángulo de guiñada óptimo en la dirección del viento. Los dos puntos de medición se pueden disponer simétricamente al eje de la turbina eólica en un plano horizontal. Cuando se produce un error de guiñada, la velocidad del viento y/o la presión de estancamiento serán mayores en uno de los dos puntos de medición. A continuación, la góndola se debe girar en la dirección de este punto de medición para corregir el error de guiñada. También se puede usar una disposición asimétrica. En este caso, se medirá una diferencia en la velocidad del viento y/o la presión de estancamiento entre los dos puntos de medición incluso cuando el error de guiñada sea cero. Esta diferencia se puede compensar mediante una calibración.

40 La invención proporciona además una turbina eólica de un tipo de eje horizontal que incluye un sensor de acuerdo con la invención. En otras palabras, el sensor está montado en el buje de la turbina eólica capaz de medir la presión de estancamiento y/o la velocidad del viento en dos puntos de medición diferentes a lo largo de un plano horizontal del buje.

5 Se proporciona un procedimiento para ajustar un ángulo de guiñada de una góndola de una turbina eólica. El procedimiento según la invención comprende una etapa de medir una primera presión de estancamiento y/o una primera velocidad del viento en una primera posición de un lado frontal de un buje, por lo que la presión de estancamiento y la velocidad del viento se miden usando un sensor de detección de error de guiñada que comprende un tubo de Pitot con un puerto de presión de estancamiento y un puerto de presión dinámica situado en un lado del tubo de Pitot.

10 En una etapa siguiente, se mide una segunda presión de estancamiento y/o una segunda velocidad del viento en una segunda posición diferente de la primera posición en el lado frontal del buje. La primera y segunda posición están preferentemente en un mismo plano horizontal del buje. Están dispuestas simétricamente al eje de rotación del buje. En la siguiente etapa, el ángulo de guiñada se ajusta si se detecta una diferencia entre la primera y la segunda presión de estancamiento y/o la velocidad del viento. Por lo tanto, una góndola de la turbina eólica se gira en la dirección hacia la posición de mayor presión de estancamiento y/o velocidad del viento.

15 Los modos de realización y rasgos característicos de la invención particularmente ventajosos están dados por las reivindicaciones dependientes, como se revela en la siguiente descripción. Los rasgos característicos descritos en el contexto de una categoría de reivindicación se pueden aplicar igualmente a otra categoría de reivindicación a menos que se indique explícitamente lo contrario.

20 Los tubos de Pitot son conocidos en la medición de la velocidad de un fluido mediante la conversión de la energía cinética de un flujo en energía potencial. Se pueden montar en el lado frontal de un buje de una turbina eólica. Permiten medir las presiones de estancamiento, así como medir la velocidad del viento.

25 Como se indica anteriormente, el sensor de detección de error de guiñada comprende un tubo de Pitot montado para medir mientras gira un rotor de la turbina eólica. Si el tubo de Pitot se monta algo separado del eje del rotor, las presiones de estancamiento y/o la velocidad del viento se pueden medir secuencialmente en las dos posiciones diferentes. Por ejemplo, la primera medición se toma cuando el tubo de Pitot montado está en un ángulo de azimut de 90° y una segunda medición se toma cuando el tubo de Pitot está en un ángulo de azimut de 270°, o en otras palabras, cuando el rotor ha realizado media vuelta. De forma ventajosa, solo es necesario un tubo de Pitot adaptado para medir una velocidad o una presión de estancamiento para medir en dos puntos diferentes. El error de guiñada se puede medir durante el funcionamiento de la turbina eólica, lo que permite una rápida corrección de un error de guiñada detectado.

35 En otro modo de realización, el tubo de Pitot montado está adaptado para medir en las dos posiciones diferentes durante una parada de la turbina eólica. El tubo de Pitot se puede montar en el centro del buje en línea con el eje del rotor y estar provisto de dos puntos de medición. En este modo de realización, es posible corregir un error de guiñada antes de hacer funcionar la turbina eólica. También es posible en este modo de realización medir secuencialmente durante el funcionamiento de la turbina eólica de la misma manera que se describe anteriormente con referencia al modo de realización previo.

40 En otro modo de realización, el sensor incluye una unidad de evaluación que está adaptada para calcular un error de guiñada a partir de una comparación de las presiones de estancamiento y/o velocidades del viento medidas en las dos posiciones diferentes a lo largo de un plano horizontal del buje. La corrección de un error de guiñada no requiere calcular el error de guiñada por sí mismo. Es suficiente saber si hay una diferencia en las velocidades medidas y/o las presiones de estancamiento medidas. De forma ventajosa, con el error de guiñada calculado, se puede controlar un actuador de guiñada para ajustar exactamente la posición de la góndola de la turbina eólica. De lo contrario, es posible una aproximación incremental al ángulo de guiñada correcto. En una aproximación incremental, la posición de la góndola se ajusta mediante un ángulo predefinido en la dirección indicada por la medición. Una siguiente medición mostrará a continuación si el ajuste fue suficiente o si es necesario realizar otro ajuste.

50 En un modo de realización, el tubo de Pitot comprende un solo puerto de presión de estancamiento y un solo puerto de presión dinámica. En este modo de realización, se puede usar un tubo de Pitot muy simple que comprende solo dos puertos. Aunque solo se proporciona un puerto de presión de estancamiento y un puerto de presión dinámica, una medición secuencial permite medir en dos posiciones diferentes en un plano horizontal, siempre que el rotor esté girando.

60 En otro modo de realización, el tubo de Pitot comprende un único puerto de presión de estancamiento y al menos dos puertos de presión dinámica situados en lados opuestos del tubo de Pitot. A continuación, la primera diferencia entre la presión de estancamiento medida en el único puerto de presión de estancamiento y una primera presión dinámica medida en uno de los dos puertos de presión dinámica se comparará con una diferencia entre la presión de estancamiento medida en el único puerto de presión de estancamiento y la segunda presión dinámica medida en el segundo de los dos puertos de presión dinámica. Si las dos diferencias son iguales, la góndola está en el ángulo de guiñada óptimo; de lo contrario, la góndola debe girarse hacia el puerto de presión dinámica donde la diferencia es mayor.

En un modo de realización preferente, el tubo de Pitot comprende dos puertos de presión de estancamiento que están dispuestos en superficies inclinadas de forma diferente de un extremo frontal del tubo de Pitot. El tubo de Pitot comprende además dos puertos de presión dinámica que están situados en lados opuestos del tubo de Pitot. Las superficies inclinadas de forma diferente darán lugar a una diferencia en la presión de estancamiento en los dos puertos de presión de estancamiento dependiendo de la dirección del viento. Una comparación de las dos presiones de estancamiento es suficiente para detectar el error de guiñada. Por tanto, no es necesario medir la presión dinámica. Además, es posible incrementar la exactitud de la medición usando la diferencia entre la presión de estancamiento y la presión dinámica, así como la diferencia entre las dos presiones de estancamiento.

De forma ventajosa, las superficies inclinadas de forma diferente están inclinadas en un ángulo de aproximadamente 1 a 10° con respecto a un plano que es perpendicular al eje del rotor. Con un ángulo de aproximadamente 1 a 10°, preferentemente a aproximadamente 5°, todavía hay un punto de estancamiento provisto en los puertos de presión de estancamiento, pero el componente dinámico ya es importante, lo que da lugar a una diferencia más importante entre las presiones de estancamiento medidas cuando hay un error de guiñada. Una diferencia de presión de estancamiento entre los dos puertos indica que la góndola de la turbina eólica no está orientada correctamente para hacer frente al viento.

En un modo de realización preferente, el tubo de Pitot comprende tres puertos de presión de estancamiento. Uno de los puertos de presión de estancamiento está situado preferentemente en el centro de una cara frontal del tubo de Pitot y los otros dos puertos de presión de estancamiento están dispuestos en superficies inclinadas de forma diferente de la cara frontal del tubo de Pitot. El tubo de Pitot comprende además preferentemente dos puertos de presión dinámica que están situados en lados opuestos del tubo de Pitot.

Es una ventaja del mayor número de puertos que se pueda mejorar la exactitud de la medición. La primera posibilidad de medición es tomar una primera diferencia entre la presión de estancamiento medida en el puerto situado en el medio, es decir el centro, del tubo de Pitot y la presión de estancamiento medida en uno de los puertos de presión de estancamiento dispuestos en superficies inclinadas y para compararla con una segunda diferencia tomada entre la presión de estancamiento medida en el puerto de presión de estancamiento situado en el centro de la cara frontal del tubo de Pitot y la presión de estancamiento medida en el otro de los puertos de presión de estancamiento dispuesto en superficies inclinadas. A continuación, la góndola debe girarse hacia el puerto de presión de estancamiento donde la diferencia es mayor. Además, es posible medir la diferencia entre la presión de estancamiento y la presión dinámica medida en los puertos de presión dinámica. Al conocer el valor local de la densidad del aire a partir de las mediciones de presión y temperatura, se puede aplicar la ecuación de Bernoulli:

$$PC = P_{estática} + PD \quad (1)$$

en la que

PC es la presión total o de estancamiento,

$P_{estática}$ es la presión estática y

PD es la presión dinámica.

La presión dinámica PD se puede expresar mediante la velocidad v_{PC} :

$$PC = P_{estática} + 0,5 \cdot \rho \cdot v_{PC}^2 \quad (2)$$

en la que

ρ es la densidad del aire.

Resolviendo la ecuación (2) para la velocidad:

$$v_{PC} = \sqrt{\frac{2 \cdot (PC - P_{estática})}{\rho}} \quad (3)$$

Por tanto, el error de guiñada también se puede determinar en base a la comparación de la velocidad del viento entre los diferentes puertos de estancamiento.

Otros objetos y rasgos característicos de la presente invención se harán más evidentes a partir de las siguientes descripciones detalladas, consideradas conjuntamente con los dibujos adjuntos. Se ha de entender, sin embargo, que los dibujos están diseñados solamente para fines de ilustración, y no como una definición de los límites de la invención.

- 5 La FIG. 1 muestra una representación esquemática de una turbina eólica de acuerdo con la técnica anterior;
- la FIG. 2 muestra una vista superior esquemática de una turbina eólica de acuerdo con la invención;
- 10 la FIG. 3 muestra una sección longitudinal esquemática de un tubo de Pitot para su uso en un primer modo de realización de la invención;
- la Fig. 4 muestra una sección longitudinal esquemática de un tubo de Pitot para su uso en un segundo modo de realización de la invención;
- 15 la FIG. 5 muestra una sección longitudinal esquemática de un tubo de Pitot para su uso en un tercer modo de realización de la invención;
- la FIG. 6 muestra una sección longitudinal esquemática de un tubo de Pitot para su uso en un cuarto modo de realización de la invención;
- 20 la FIG. 7 muestra etapas de un procedimiento de acuerdo con un modo de realización de la invención en un diagrama esquemático.
- 25 En los diagramas, los números de referencia similares se refieren a objetos similares en toda la descripción. Los objetos en los diagramas no están necesariamente dibujados a escala.

La FIG. 1 muestra una vista esquemática de una turbina eólica convencional 1. Una góndola 3 se monta en una torre 2. Entre la góndola 3 y la torre 2 se instala un sistema de guiñada 6. El sistema de guiñada 6 permite girar la góndola 3 alrededor de un eje 9 que es el eje longitudinal de la torre 2. En otras palabras, el sistema de guiñada 6 permite girar la góndola 3 a lo largo de un plano horizontal. En un extremo frontal de la góndola 3 hay un buje 4. Las palas 5 que forman un rotor están unidas al buje 4. El extremo frontal del buje 4 también se denomina ruleta y se puede realizar como una pieza separada. En la FIG. 1, el extremo frontal del buje o la ruleta tiene una forma cónica. A continuación, no se hará ninguna diferencia entre una ruleta y el extremo frontal del buje. El sistema de guiñada 6 hace girar la góndola 3 de modo que el buje se oriente hacia la dirección del viento.

Normalmente, una turbina eólica comprende dos o tres palas 5 que forman el rotor junto con el buje 4. La turbina eólica 1 es de tipo horizontal con un eje horizontal 8 que es el eje de rotación del rotor. En la parte superior de la góndola 3 está montado un sensor de dirección del viento 7. La dirección del viento se mide normalmente con el sensor de dirección del viento 7 que comprende una veleta. En su lugar, se puede usar otro tipo de sensor de viento. Es una desventaja que el sensor de dirección del viento 7 esté montado en la góndola 3 detrás del rotor. La medición se efectúa mediante el remolino formado por el rotor. La inexactitud introducida debido al remolino da lugar a desalineaciones y en consecuencia a una pérdida en la producción de energía.

45 La FIG. 2 muestra en una vista superior esquemática una turbina eólica de acuerdo con un modo de realización de la invención. Un buje 4 que soporta palas 5 está dispuesto en un extremo frontal de una góndola 3. El rotor formado por las palas 5 y el buje 4 gira alrededor de un eje horizontal 8. La góndola 3 se puede girar alrededor de un eje 9 mediante un sistema de guiñada 6. El extremo frontal del buje 4 de la FIG. 2 se muestra plano. Esto no debe entenderse como una limitación. El extremo frontal del buje, que también se puede llamar ruleta, también puede tener otra forma, por ejemplo, cónica, como se muestra en la FIG. 1.

Un tubo de Pitot 20 está montado en un extremo frontal del buje 4. El tubo de Pitot 20 está montado centralmente en el extremo frontal. El tubo de Pitot 20 está adaptado para medir una presión de estancamiento o una velocidad del viento en dos posiciones diferentes a lo largo de un plano horizontal del buje. También es posible que el tubo de Pitot 20 esté adaptado para medir la presión de estancamiento y la velocidad del viento. Los datos medidos por el tubo de Pitot 20 se transmiten a una unidad de evaluación 23. La unidad de evaluación 23 se puede adaptar para calcular un error de guiñada a partir de una comparación de las presiones de estancamiento y/o velocidades del viento medidas en las dos posiciones diferentes a lo largo de un plano horizontal del buje.

60 La unidad de evaluación 23 está conectada a una unidad de control 22, que está conectada al sistema de guiñada 6. La unidad de evaluación 23 y la unidad de control 22 se indican solo esquemáticamente. Se pueden colocar en el buje 4, la góndola 3 o en cualquier otro lugar de la turbina eólica o cerca de la turbina eólica. Se pueden integrar en un ordenador principal o funcionar como un sistema separado que suministra una señal al ordenador principal.

65 En lugar o además del tubo de Pitot 20, también es posible montar un tubo de Pitot 21 que está montado fuera del centro del buje 4, es decir, alejado del eje 8 en el lado frontal del buje 4. La diferencia entre una ubicación como se

muestra para el tubo de Pitot 20 y una ubicación como se muestra para el tubo de Pitot 21 es que el tubo de Pitot 20 solo medirá el viento que se aproxima. Por el contrario, el tubo de Pitot 21 registrará una dirección del viento resultante afectada por una velocidad del viento tangencial que depende de la velocidad del rotor. Esto puede no ser un problema para distancias pequeñas desde el centro ya que la velocidad del viento tangencial depende de la longitud del radio. La ubicación dependerá además de cómo se forme el extremo frontal del buje 4, ya que esto influye en la distribución del viento en el extremo frontal del buje 4. Por ejemplo, algunas áreas del extremo frontal o la ruleta pueden tener velocidades de viento aceleradas y otros lugares son puntos de estancamiento. Con una simulación de la dinámica de fluidos usando, por ejemplo, CFD (dinámica de fluido computacional) para el extremo frontal del buje en el que se va a colocar el tubo de Pitot, es posible determinar el lugar de montaje más adecuado que no tenga velocidades de viento aceleradas ni se encuentre en un punto de estancamiento.

Las flechas 24, 25 y 26 indican diferentes direcciones posibles del viento. Cuando el viento sopla como indica la flecha 24, es decir, directamente a lo largo del eje 8 en la posición de la góndola 3 representada en esta figura, no hay error de guiñada. La góndola 3 de la turbina eólica está perfectamente orientada hacia el viento y se optimiza la producción de energía. La orientación de la turbina eólica es óptima.

Cuando sopla el viento como lo indica la flecha 25, hay un error de guiñada. El sistema de guiñada 6 debe girar la góndola 3 en sentido antihorario en un plano horizontal como se muestra en la FIG. 2. El tubo de Pitot 20, que está adaptado para medir en dos posiciones diferentes, medirá una presión de estancamiento más alta en el lado hacia la flecha 25 y una presión más baja en la segunda posición que en la FIG. 2 está más cerca de la flecha 26. El tubo de Pitot 21 medirá una presión de estancamiento más alta cuando esté en el lado hacia la flecha 25 y una presión más baja cuando esté en el lado hacia la flecha 26. La unidad de evaluación 23 evaluará la diferencia y dará un comando a la unidad de control 22. La unidad de control 22 controlará el sistema de guiñada 6 para girar la góndola 3 en sentido antihorario.

Existen al menos dos modos de realización posibles. En primer lugar, la unidad de evaluación 23 se puede adaptar para calcular el error del ángulo de guiñada y la unidad de control 22 se puede adaptar a continuación para ajustar la dirección de la góndola 3 según el ángulo calculado.

En un segundo modo de realización preferente, la unidad de evaluación 23 está adaptada para evaluar hacia qué lado de la góndola 3 debe girarse para minimizar el error. No es necesario evaluar exactamente el ángulo de guiñada. A continuación, la unidad de control 22 está adaptada para girar la góndola 3 alrededor de un pequeño ángulo fijo. Los tubos de Pitot 20, 21 continúan midiendo y continuará el ajuste al mejor ángulo de guiñada. La posición óptima se encuentra mediante un proceso iterativo.

En el caso del tubo de Pitot 21, se requerirá alguna compensación, por ejemplo, compensación de sesgo en función de la velocidad de rotación y el azimut. Debe entenderse que la compensación de sesgo indica una presión adicional que resulta de colocar el sensor fuera del centro. Cuando el sensor se coloca fuera del centro, se mide adicionalmente una velocidad tangencial que podría ser despreciable con el tubo de Pitot 20.

La velocidad tangencial se puede calcular para

$$V_{\text{tan}} = \omega r$$

Con r la distancia desde el centro y ω la velocidad angular. La presión adicional es proporcional a la velocidad de rotación ω , por tanto, puede compensarse mediante la calibración y los ajustes de ganancia adecuados. El posprocesamiento puede ser necesario usando localización de azimut como se explica a continuación en el presente documento.

Los valores de medición de presión son una señal periódica con una frecuencia de $1P$. P significa "por rotación". Es periódica porque después de una rotación completa, el tubo de Pitot 21 volverá a medir en el mismo ángulo de azimut. La señal periódica puede ser un seno o cualquier otra señal periódica. Al dividir las mediciones en localizaciones de determinados intervalos de azimut, es posible estimar la amplitud y la fase de la señal periódica. Esto requiere un muestreo alrededor del azimut, por ejemplo, 64 muestras por rotación.

Como ejemplo, se explicará una regresión de señal sinusoidal.

La señal medida se divide por ejemplo en doce localizaciones de azimut de 0-30, 30-60, 60-90, ..., 330-360 grados, después de lo cual se calcula el promedio de cada localización. A continuación, el promedio de todas las localizaciones se resta de los promedios de las localizaciones individuales, eliminando por tanto el sesgo o el contenido de DC. La amplitud de las señales del actuador de guiñada localizadas se determina como la raíz cuadrada de dos veces la desviación estándar de todas las localizaciones. Se usa una función de coste de suma de cuadrados para alinear la señal localizada y un seno en base a la amplitud estimada y la frecuencia $1P$, proporcionando el valor de desplazamiento de fase.

La amplitud y la fase están vinculadas al error de guiñada por alguna función de transferencia. La función de transferencia se puede derivar analíticamente o mediante una prueba empírica en la que la turbina está expuesta a

varios errores de guiñada conocidos. La amplitud y la fase también se pueden determinar mediante un procedimiento de DFT (transformada discreta de Fourier), por ejemplo, el algoritmo de Goertzel o mediante procedimientos de FFT (transformada rápida de Fourier) para la estimación de fase y magnitud para extraer el error de guiñada. La componente tangencial del viento será más importante cuanto más descentrado esté el tubo de Pitot.

5 Para todas las mediciones debe entenderse que preferentemente se toman promedios. Normalmente, una rotación del rotor tarda aproximadamente 4 segundos. Medir secuencialmente y tomar estimaciones, o medidas promediadas, cada 30 segundos o puede ser también cada 10 minutos es suficiente para determinar un error de ángulo de guiñada. Típicamente, una turbina no guiña más de alrededor del 10-15 % del tiempo de producción, por lo que hay tiempo para hacer un promedio. Los promedios más largos de 10 minutos también son interesantes para determinar un error de guiñada estático cuando se usa con una veleta. Una veleta detrás del rotor normalmente tiene un error de guiñada constante debido al remolino del rotor. Por supuesto, son posibles otras etapas temporales. Se pueden seleccionar rotaciones consecutivas o las mediciones se espaciarán por un ángulo de rotación predefinido.

15 Con referencia a las FIGS. 3 a 6, se analizarán en detalle diferentes tubos de Pitot que se pueden usar con una turbina eólica de acuerdo con modos de realización de la invención.

20 La FIG. 3 muestra una sección longitudinal de un primer modo de realización de un tubo de Pitot 30. El tubo de Pitot 30 comprende un solo puerto de presión de estancamiento 32 y un solo puerto de presión dinámica 33. Para medir las presiones en los puertos 32 y 33, el tubo de Pitot 30 comprende un manómetro 34 al que están conectados los puertos 32 y 33. El manómetro 34 sólo se indica de forma muy esquemática, ya que se conoce para los tubos de Pitot convencionales y no se explicará en detalle una función general de los tubos de Pitot.

25 El puerto de presión de estancamiento 32 está situado en un extremo frontal del tubo de Pitot 30. El puerto de presión dinámica 33 está situado en una cara lateral del tubo de Pitot 30. Los puertos 32 y 33 están unidos al manómetro 34 mediante tubos. Aunque la parte restante del tubo de Pitot se muestra masiva, este no es necesariamente el caso. Cualquier construcción de tubo de Pitot es posible siempre que sea posible medir en el puerto 32 una presión de estancamiento y en el puerto 33 una presión dinámica.

30 Como en la FIG. 2, tres flechas 24, 25 y 26 indican posibles direcciones del viento cuando el tubo de Pitot 30 está montado en la posición del tubo de Pitot 21 en la FIG. 2. Cuando el rotor de la turbina eólica 1 está girando, se puede medir una primera presión de estancamiento o una primera velocidad del viento en un ángulo de azimut de 90°. Una segunda presión de estancamiento o una segunda velocidad del viento se puede medir un poco más tarde en un ángulo de azimut de 270°. Un poco más tarde significa que el rotor ha girado aproximadamente 180° o aproximadamente 180° más una serie de rotaciones completas. El tubo de Pitot 30 no se puede usar montado en el centro del rotor en una posición del tubo de Pitot 20 en la FIG. 2.

35 Una unidad de evaluación 23 puede calcular la diferencia de las presiones de estancamiento o las velocidades del viento medidas en las dos posiciones diferentes y enviar una señal de actuación a una unidad de control 22.

40 La FIG. 4 muestra una sección longitudinal de un tubo de Pitot 40 de acuerdo con un segundo modo de realización. Como se explica con referencia al tubo de Pitot 30, no es necesario que el tubo de Pitot 40 esté construido masivamente como se muestra en la sección. El tubo de Pitot 40 comprende un único puerto de presión de estancamiento 42 y dos puertos de presión dinámica 43 y 44. Los tres puertos 42, 43, 44 están conectados a un manómetro 45 mediante tubos.

45 El tubo de Pitot 40 puede montarse en una posición como el tubo de Pitot 20 en el centro de un buje o en la posición del tubo de Pitot 21 en la FIG. 2, es decir, fuera del centro. El puerto de presión de estancamiento 42 está situado en un extremo frontal del tubo de Pitot 40. El puerto de presión dinámica 43 está situado en un lado del tubo de Pitot 40. El puerto de presión dinámica 44 está situado en un lado del tubo de Pitot 40 opuesto al puerto 43. Un lado opuesto significa en el otro lado del eje central 8. El puerto 44 puede estar situado simétricamente al puerto 43 con respecto al eje medio 8 del tubo de Pitot 40.

50 Como en las FIGS. 2 y 3, tres flechas 24, 25 y 26 indican posibles direcciones del viento. El tubo de Pitot 40 permite medir una presión de estancamiento en el puerto único 42 y la presión dinámica en cada lado del tubo en los puertos 43 y 44. Por tanto, se pueden tomar dos medidas estáticas:

$$P_{\text{estática, izquierda}} = P_C - P_{D_{\text{izquierda}}}$$

60 y

$$P_{\text{estática, derecha}} = P_C - P_{D_{\text{derecha}}}$$

En las que PC es la presión total o de estancamiento medida en el puerto 42, $P_{D_{izquierda}}$ es la presión dinámica medida en un lado izquierdo, por ejemplo en el puerto 43, y $P_{D_{derecha}}$ es la presión dinámica medida en un lado derecho, por ejemplo en el puerto 44. $P_{estática, izquierda}$ es entonces la presión estática que se puede calcular como la diferencia entre la presión de estancamiento y la presión dinámica de la izquierda. $P_{estática, derecha}$ es entonces la presión estática que se puede calcular como la diferencia entre la presión de estancamiento y la presión dinámica de la derecha.

Calculando la diferencia de las dos presiones estáticas $P_{estática, izquierda} - P_{estática, derecha}$ es posible evaluar si la góndola 3 debe girarse hacia la izquierda o hacia la derecha.

Si el viento sopla en la dirección indicada por la flecha 24, entonces $P_{estática, izquierda}$ será la misma que $P_{estática, derecha}$ y no es necesario ajustar el ángulo de guiñada. Si el viento sopla en la dirección indicada por la flecha 25, entonces $P_{estática, izquierda}$ será más alta que $P_{estática, derecha}$ y la góndola debe girarse hacia la izquierda. Si el viento sopla en la dirección indicada por la flecha 26, entonces $P_{estática, izquierda}$ será más baja que $P_{estática, derecha}$ y la góndola debe girarse hacia la derecha.

La FIG. 5 muestra una sección longitudinal de un tubo de Pitot 50 de acuerdo con un tercer modo de realización. Como es el caso del tubo de Pitot 30 y del tubo de Pitot 40 (véanse las FIGS. 3 y 4), no es necesario que el tubo de Pitot 50 esté construido masivamente como se muestra en la sección. El tubo de Pitot 50 comprende dos puertos de presión de estancamiento 53, 54 y dos puertos de presión dinámica 55 y 56. Los cuatro puertos están conectados a un manómetro 57 mediante tubos.

El tubo de Pitot 50 puede montarse en una posición como el tubo de Pitot 20 en el centro del buje 4 o en la posición del tubo de Pitot 21 en la FIG. 2, fuera del centro. Los puertos de presión de estancamiento 53 y 54 están situados en un extremo frontal del tubo de Pitot 50. El puerto de presión dinámica 55 está situado en un lado del tubo de Pitot 50. El puerto de presión dinámica 56 está situado en un lado del tubo de Pitot 50 opuesto al puerto 55. Un lado opuesto significa en el otro lado de un eje central 8. El puerto 56 puede estar situado simétricamente al puerto 55 con respecto al eje medio 8 del tubo de Pitot 50.

Los puertos 53 y 54 están dispuestos en superficies inclinadas de forma diferente 51 y 52 del extremo frontal del tubo de Pitot 50. La superficie 51 está inclinada en un ángulo α y la superficie 52 está inclinada en un ángulo β con respecto a un plano que es perpendicular al eje 8.

Como en las FIGS. 2, 3 y 4, tres flechas 24, 25 y 26 indican posibles direcciones del viento. El tubo de Pitot 50 permite medir una presión de estancamiento en los dos puertos 53 y 54 y una presión dinámica en cada lado del tubo en los puertos 55 y 56. Debido a las superficies inclinadas 51, 52, los puertos 53 y 54 no tienen el mismo ángulo de ataque para el viento y no miden la misma presión de estancamiento. Siempre que los ángulos α y β estén por debajo de aproximadamente 10° , se puede suponer que todavía se producirá un estancamiento y que se podrá medir una presión de estancamiento.

El tubo de Pitot 50 medirá la mayor presión de estancamiento en el puerto 54 cuando el viento provenga de una dirección indicada por la flecha 25 con un ángulo β entre la dirección del viento y el eje 8 del tubo de Pitot, es decir, cuando el viento es frontal a la superficie inclinada 52 en cuyo puerto 54 se sitúa. Por el contrario, el tubo de Pitot 50 medirá la presión de estancamiento más alta en el puerto 53 cuando el viento provenga de una dirección indicada por la flecha 26 con un ángulo α entre la dirección del viento y el eje 8 del tubo de Pitot, es decir, cuando el viento es frontal a la superficie inclinada 51 en cuyo puerto 53 se sitúa. Por tanto, se puede determinar hacia qué lado de la góndola 3 debe girarse simplemente comparando las dos presiones de estancamiento en los puertos 53 y 54. El tubo de Pitot 50 tiene una mayor sensibilidad o respuesta dinámica usando la presión de estancamiento.

Usar la presión dinámica medida en los puertos 55 y 56, también es posible con el tubo de Pitot 50, así como calcular una diferencia entre dos presiones estáticas $P_{estática, izquierda} - P_{estática, derecha}$ como se explica para el tubo de Pitot 40, usando el puerto 54 en combinación con el puerto 55 y el puerto 53 en combinación con el puerto 56.

La FIG. 6 muestra una sección longitudinal de un tubo de Pitot 60 de acuerdo con un cuarto modo de realización. Como es el caso de los tubos de Pitot 30, 40 y 50 (véanse las FIGS. 3 a 5), no es necesario que el tubo de Pitot 60 esté construido masivamente como se muestra en la sección. El tubo de Pitot 60 comprende tres puertos de presión de estancamiento 64, 65 y 66 y dos puertos de presión dinámica 67 y 68. Los cinco puertos 64, 65, 66, 67, 68 están conectados a un manómetro 69 mediante tubos.

El tubo de Pitot 60 puede montarse en una posición como el tubo de Pitot 20 en el centro de un buje o en la posición del tubo de Pitot 21 en la FIG. 2, fuera del centro. Los puertos de presión de estancamiento 64, 65 y 66 están situados en un extremo frontal del tubo de Pitot 60. El puerto de presión dinámica 67 está situado en un lado del tubo de Pitot 60. El puerto de presión dinámica 68 está situado en un lado del tubo de Pitot 60 opuesto al puerto 67. Un lado opuesto significa en el otro lado de un eje central 8. El puerto 67 puede estar situado simétricamente al puerto 68 con respecto al eje medio 8 del tubo de Pitot 60. El puerto de presión de estancamiento 64 está dispuesto en un extremo frontal del tubo de Pitot 60 en una superficie 62 que es aproximadamente perpendicular al eje 8 del

tubo. Los puertos 65 y 66 están dispuestos en superficies inclinadas de forma diferente 61 y 63 del extremo frontal del tubo de Pitot 60. Las superficies están inclinadas en un ángulo α y β , respectivamente, con respecto a un plano que es perpendicular al eje 8. Los ángulos α y β están por debajo de aproximadamente 10° y todavía se producirá un estancamiento y se podrá medir una presión de estancamiento.

5 El tubo de Pitot 60 tiene el mayor número de puertos de medición y permite el mayor número de mediciones diferentes que se pueden usar para refinarse entre sí y mejorar la exactitud.

10 Como en las FIGS. 2, 3, 4 y 5, tres flechas 24, 25 y 26 indican posibles direcciones del viento. El tubo de Pitot 60 permite medir una presión de estancamiento en los tres puertos 64, 65 y 66 y una presión dinámica en cada lado del tubo en los puertos 67 y 68. Debido a las superficies inclinadas de forma diferente 61, 62 y 63, los puertos 64, 65 y 66 no tienen el mismo ángulo de ataque para el viento y no miden la misma presión de estancamiento. Se aplican las mismas explicaciones que para el tubo de Pitot 50 y no se repetirán. Con el tubo de Pitot 60 es posible, por ejemplo, calcular una diferencia entre las presiones medidas en los puertos 64 y 66 y una diferencia entre las presiones medidas en los puertos 64 y 65 y comparar estas diferencias para decidir en qué dirección girar la góndola 3 para optimizar la producción de energía.

15 Usar la presión dinámica medida en los puertos 67 y 68, también es posible con el tubo de Pitot 60 para calcular una diferencia entre dos presiones estáticas $P_{\text{estática, izquierda}} - P_{\text{estática, derecha}}$ como se explica para los tubos de Pitot 40 y 50.

20 Todos los tubos de Pitot descritos se pueden usar además de una veleta convencional en la parte superior de una góndola para mejorar la exactitud de la alineación. De esta manera, la veleta controla una alineación aproximada mientras que las mediciones efectuadas con el tubo de Pitot se usarán para un refinamiento.

25 Debe entenderse que, aunque se centre en la explicación de la detección del error de guiñada comparando las presiones de estancamiento, es posible con todos los tubos de Pitot descritos calcular las velocidades del viento usando la ecuación (3) y comparar las velocidades del viento.

30 La FIG. 7 muestra en un diagrama de flujo las etapas de un procedimiento para ajustar un ángulo de guiñada de una góndola 3 de una turbina eólica 1 de acuerdo con un modo de realización de la invención. En una etapa I se inicializa un sensor adaptado para medir una primera presión de estancamiento o una primera velocidad del viento. Se puede realizar una calibración, por ejemplo, para compensar una ubicación descentrada del sensor.

35 En una etapa II se mide una primera presión de estancamiento y/o una primera velocidad del viento en una primera posición de un lado frontal de un buje 4 de la turbina eólica. La medición se puede efectuar mientras la turbina eólica está girando o cuando se usa la turbina eólica parada de acuerdo con el sensor.

40 En una etapa III se mide una segunda presión de estancamiento y/o una segunda velocidad del viento en una segunda posición. La segunda posición es diferente de la primera posición del lado frontal del buje 4. La segunda posición puede ser diferente porque se usa un segundo sensor montado en una segunda posición. La segunda posición también puede ser diferente para un solo sensor, cuando el sensor está colocado descentrado y la turbina eólica ha girado. La primera y segunda posición están en un mismo plano horizontal del buje, es decir, en un plano que es perpendicular al eje de rotación 9 de la góndola 3 alrededor del cual la góndola 3 puede girar mediante el sistema de guiñada 6.

45 En una etapa IV se determina una diferencia entre la primera y la segunda presión de estancamiento y/o la velocidad del viento. En el caso de que no haya diferencia, es decir, cuando la respuesta a la pregunta de si la presión de estancamiento y/o la velocidad del viento en una de las dos posiciones es mayor que en la otra posición es "no", la medición continúa en la etapa II.

50 Por el contrario, cuando la respuesta es "sí", se emite una señal en la etapa V que controla el actuador de guiñada para rotar la góndola 3 de la turbina eólica 1 en una dirección hacia la posición de mayor presión de estancamiento y/o velocidad del viento.

55 La rotación se puede efectuar mediante ángulos predefinidos o mediante un ángulo de guiñada que se calcula a partir de los resultados de la medición. Aunque la presente invención se ha descrito en forma de modos de realización preferentes y variaciones de la misma, se entenderá que podrían realizarse numerosas modificaciones y variaciones adicionales sin apartarse del alcance de la invención, como se define por las reivindicaciones adjuntas. Por motivos de claridad, debe entenderse que el uso de "un" o "una" en esta solicitud no excluye una pluralidad, y "que comprende" no excluye otras etapas o elementos. Una "unidad" puede comprender varias unidades, a menos que se indique lo contrario.

60

REIVINDICACIONES

- 5
1. Un sensor de detección de error de guiñada que está adaptado para montarse en una turbina eólica de un tipo de eje horizontal,
- 10 en el que el sensor de detección de error de guiñada está adaptado para medir una presión de estancamiento y/o una velocidad del viento en dos posiciones diferentes a lo largo de un plano horizontal del buje (4), **caracterizado por que**
- 10 el sensor de detección de error de guiñada está adaptado para montarse en un lado frontal de un buje (4) de la turbina eólica y comprende un tubo de Pitot (20, 21, 30, 40, 50, 60) con un puerto de presión de estancamiento (32, 42, 53, 54, 65, 66) y un puerto de presión dinámica (33, 43, 44, 55, 56, 67, 68) situado a un lado del tubo de Pitot (20, 21, 30, 40, 50, 60).
- 15 2. El sensor de la reivindicación 2, en el que el tubo de Pitot montado (20, 21, 30, 40, 50, 60) está adaptado para medir, mientras gira un rotor de la turbina eólica.
- 20 3. El sensor de la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el tubo de Pitot montado (40, 50, 60) está adaptado para medir en las dos posiciones diferentes durante una parada de la turbina eólica.
- 20 4. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además una unidad de evaluación (23) que está adaptada para calcular un error de guiñada a partir de una comparación de las presiones de estancamiento medidas y/o velocidades del viento en las dos posiciones diferentes a lo largo de un plano horizontal del buje (4).
- 25 5. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 1, 2 o 4, en el que el tubo de Pitot (30) comprende un solo puerto de presión de estancamiento (32) y un solo puerto de presión dinámica (33).
- 30 6. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el tubo de Pitot (40) comprende un solo puerto de presión de estancamiento (42) y dos puertos de presión dinámica (43, 44) situados en lados opuestos del tubo de Pitot.
- 35 7. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el tubo de Pitot (50, 60) comprende dos puertos de presión de estancamiento (53, 54; 64, 65, 66) dispuestos en superficies inclinadas de forma diferente (52, 52; 61, 62, 63) de un extremo frontal del tubo de Pitot y dos puertos de presión dinámica (55, 56; 67, 68) situados en lados opuestos del tubo de Pitot.
- 40 8. El sensor de la reivindicación 7, en el que las superficies (51, 52; 61, 63) están inclinadas en un ángulo de aproximadamente 1 a 10 grados y un ángulo de aproximadamente -1 a -10 grados, respectivamente, a un plano que es perpendicular al eje del rotor (8).
- 45 9. El sensor de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el tubo de Pitot (60) comprende tres puertos de presión de estancamiento (64, 65, 66), estando situado uno de los puertos de presión de estancamiento (64) en el centro de un extremo frontal del tubo de Pitot y estando dispuestos los otros dos puertos de presión de estancamiento (65, 66) en superficies inclinadas de forma diferente (61, 63) del extremo frontal del tubo de Pitot (60), comprendiendo además el tubo de Pitot dos puertos de presión dinámica (67, 68) situados en lados opuestos del tubo de Pitot.
- 50 10. Una turbina eólica de un tipo de eje horizontal que comprende un sensor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.
- 55 11. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 10, que comprende además una unidad de control de guiñada (22) que está adaptada para emitir una señal de control para hacer girar una góndola (3) de la turbina eólica dependiendo del error de guiñada detectado.
- 60 12. Un procedimiento para ajustar un ángulo de guiñada de una góndola (3) de una turbina eólica (1) que comprende las siguientes etapas:
- 60 - medir una primera presión de estancamiento y/o una primera velocidad del viento en una primera posición de un lado frontal de un buje (4) de la turbina eólica,
- 65 - medir una segunda presión de estancamiento y/o una segunda velocidad del viento en una segunda posición diferente de la primera posición del lado frontal del buje (4), estando la primera y la segunda posición en un mismo plano horizontal del buje (4), mediante el cual la presión de estancamiento y la velocidad del viento se miden usando un sensor de detección de error de guiñada que comprende un tubo de Pitot (20, 21, 30, 40, 50, 60) con un puerto de presión de estancamiento (32, 42, 53, 54, 65, 66) y un

puerto de presión dinámica (33, 43, 44, 55, 56, 67, 68) situado a un lado del tubo de Pitot (20, 21, 30, 40, 50, 60); y

5 - ajustar un ángulo de guiñada si se detecta una diferencia entre la primera y la segunda presión de estancamiento y/o velocidad del viento girando la góndola (3) de la turbina eólica en una dirección hacia la posición de mayor presión de estancamiento y/o velocidad del viento.

10 **13.** El procedimiento de la reivindicación 12, en el que se repiten las etapas de medir una primera presión de estancamiento y/o una primera velocidad del viento y una segunda presión de estancamiento y/o una primera velocidad del viento y la góndola (3) se gira en ángulos predefinidos cada vez que se detecta diferencia.

FIG 1 TÉCNICA ANTERIOR

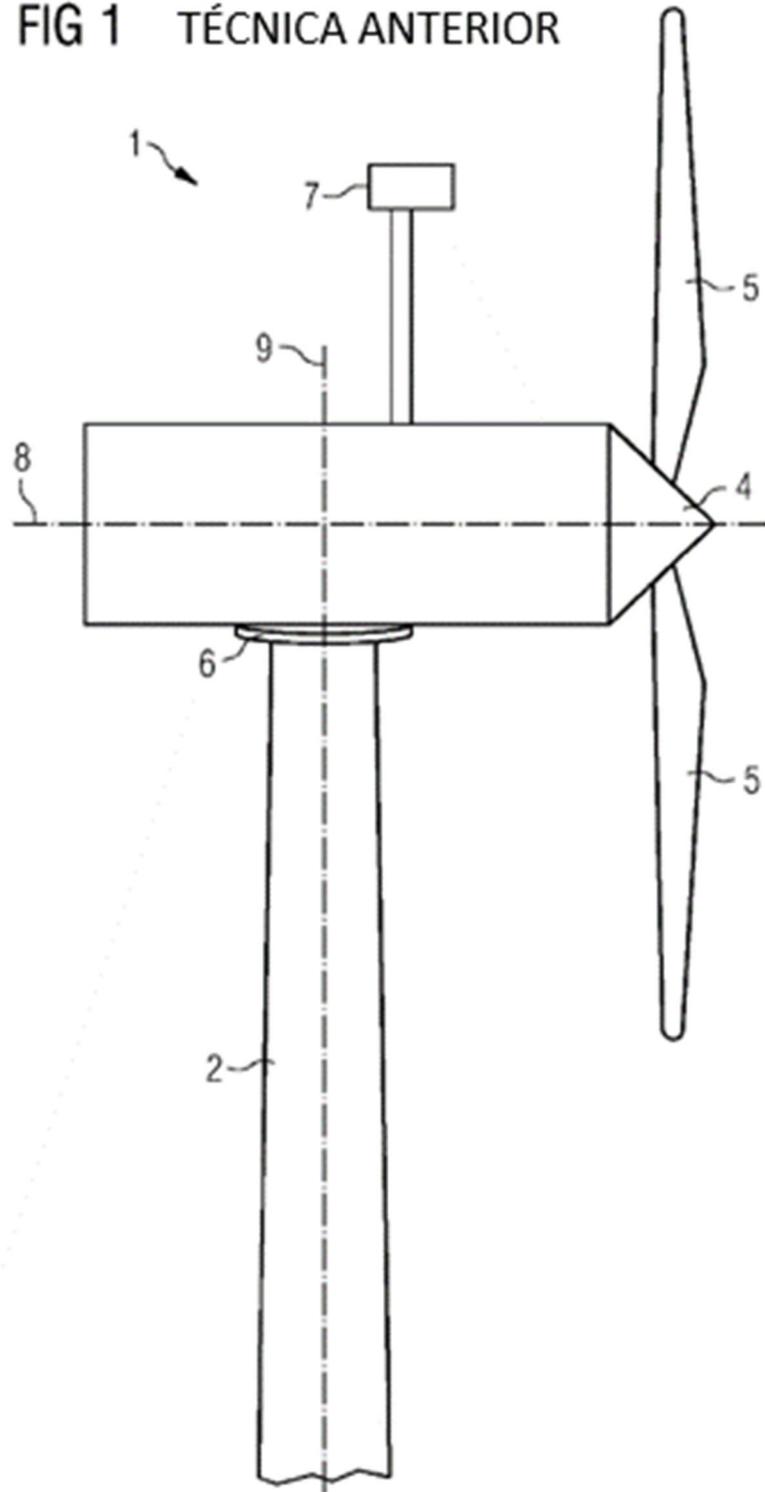


FIG 2

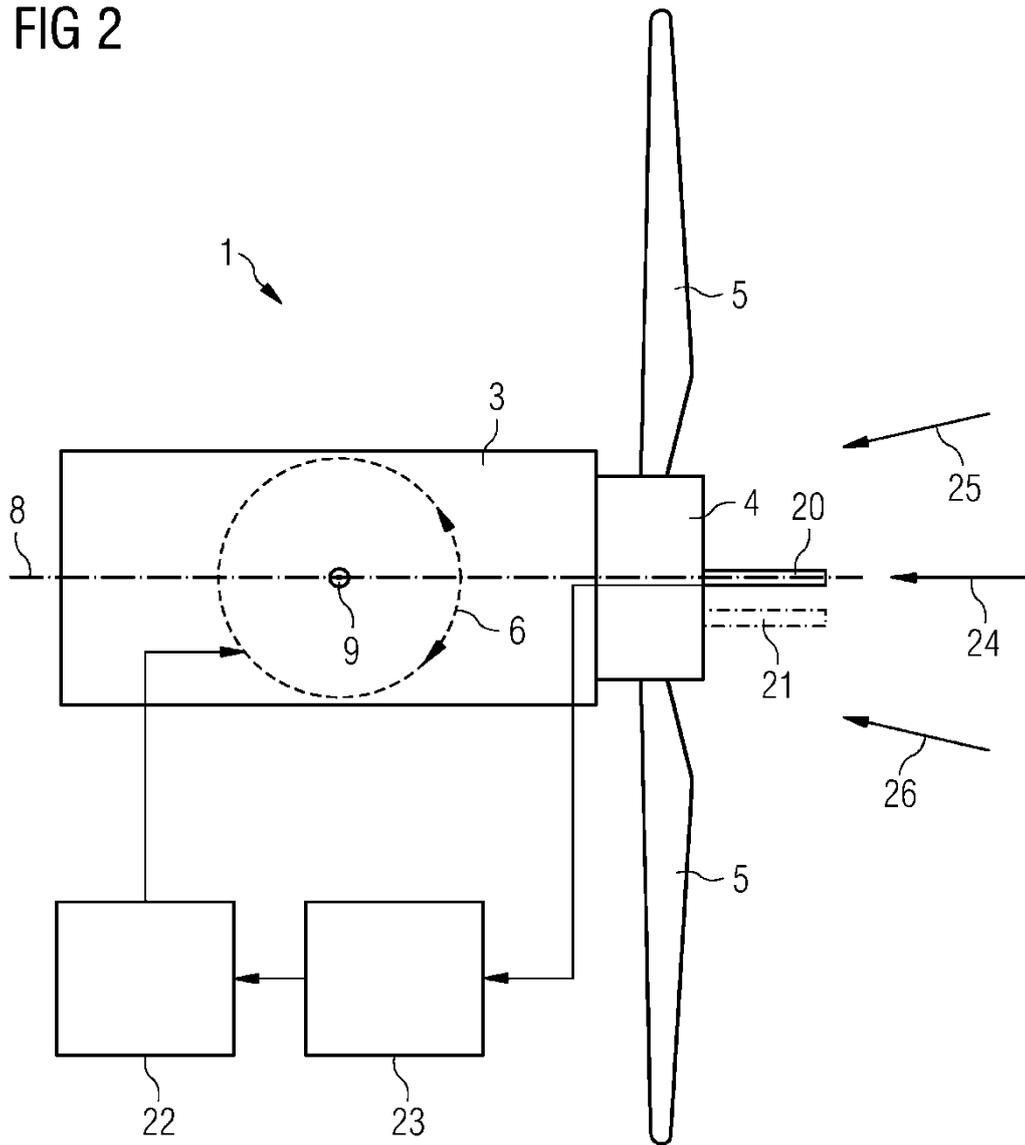


FIG 3

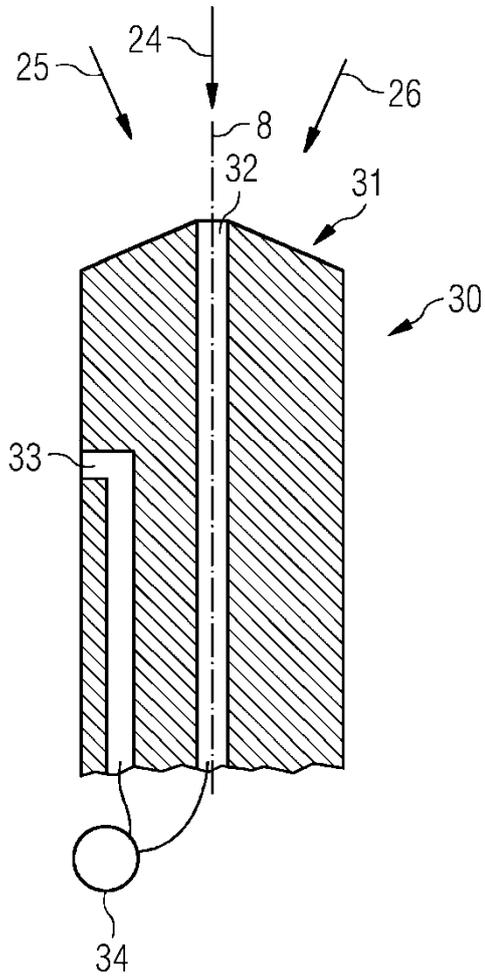


FIG 4

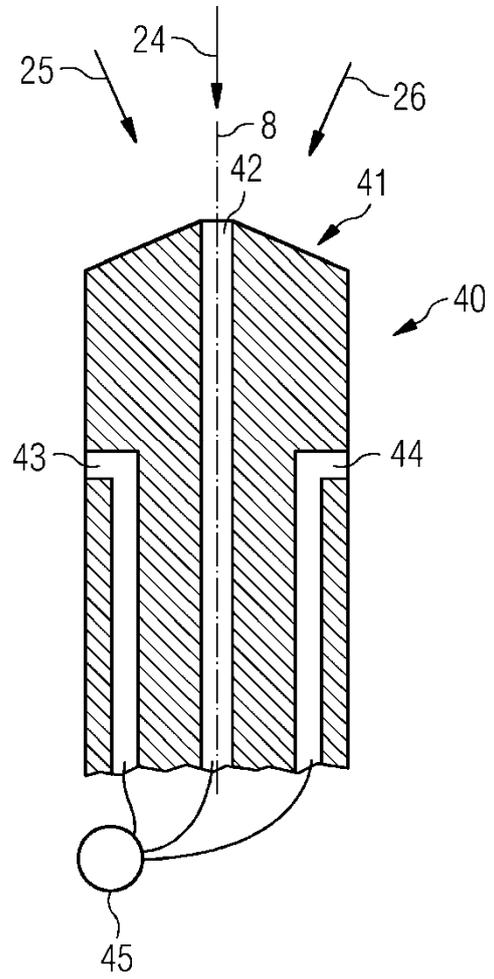


FIG 5

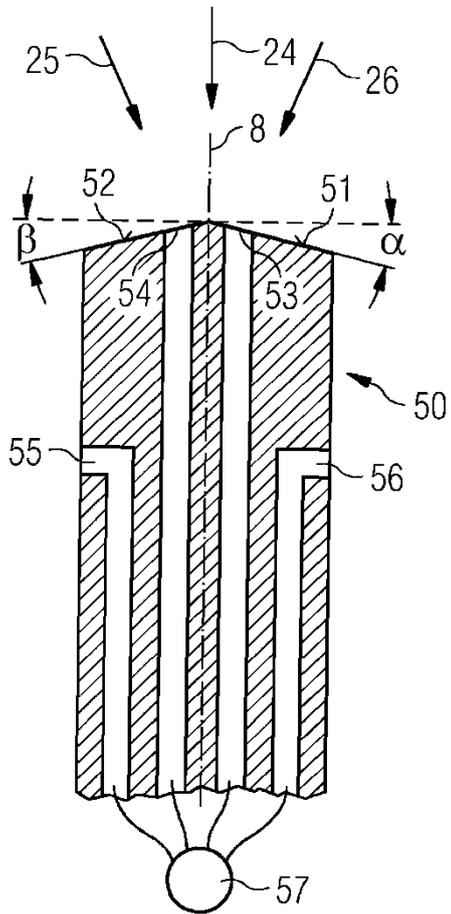


FIG 6

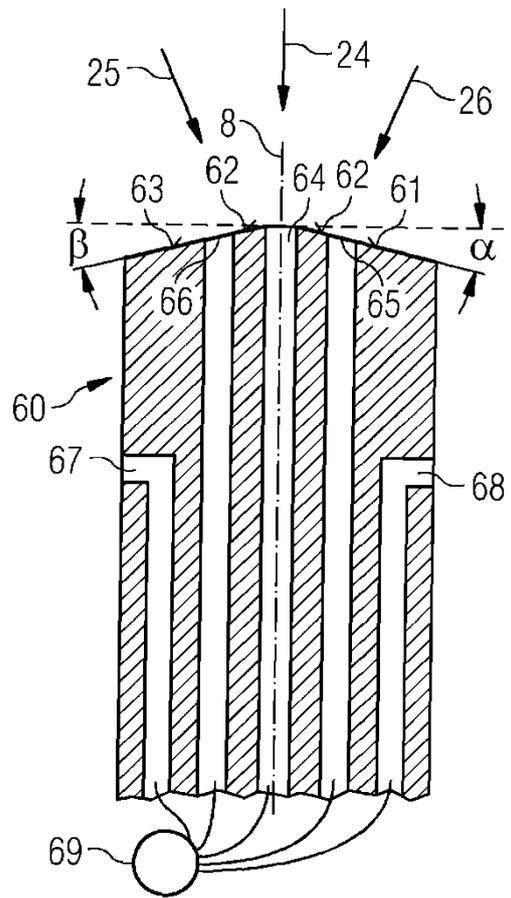


FIG 7

