

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 865 301**

51 Int. Cl.:

**F03D 13/35** (2006.01)

**F03D 17/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.06.2016 PCT/DK2016/050198**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.01.2017 WO17000948**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.06.2016 E 16731793 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.04.2021 EP 3317532**

54 Título: **Método para calibrar sensores de carga de una turbina eólica**

30 Prioridad:

**30.06.2015 DK 201570410**

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

**15.10.2021**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**CAPONETTI, FABIO;**

**ØSTERGAARD, KASPER ZINCK y**

**HILTON, DAN**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 865 301 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**

Método para calibrar sensores de carga de una turbina eólica

**5 Campo de la invención**

La presente invención se dirige a métodos para calibrar sensores de carga de una turbina eólica y una turbina eólica para dicha calibración de sensores de carga.

**10 Antecedentes de la invención**

La carga de los componentes de las turbinas eólicas se controla cuidadosamente, con el fin de maximizar la eficiencia y minimizar el desgaste y los daños. Los sensores de carga se montan normalmente en turbinas eólicas, habitualmente en las palas de rotor. Estos sensores requieren calibración con el fin de convertir los valores medidos por estos sensores en las cargas reales en los componentes de turbina.

Un método considerado anteriormente para calibrar estos sensores es un procedimiento de calibración en el que se hace girar el rotor mientras las palas están en un ángulo de cabeceo fijo. Otros métodos anteriores fijan el rotor, de manera que permanezca inmóvil mientras se toman las medidas relativas a los sensores de carga de pala, por ejemplo, mientras una pala está horizontal. Estos enfoques pueden no ser suficientes para proporcionar los datos necesarios para modelos más sofisticados de las fuerzas y momentos que actúan sobre las palas. Estos modelos más sofisticados pueden ser necesarios con el fin de evitar grandes inexactitudes en la estimación de carga, lo que puede conducir a una mitigación de desgaste o de daños insatisfactoria. También puede ser prácticamente un desafío detener el rotor en una posición específica con una precisión rigurosa. En otros métodos anteriores, se usan modelos menos sofisticados para los cálculos de carga y la calibración, tales como descuidar las cargas axiales debido a efectos centrífugos y/o descuidar la influencia de fuerzas que no están a lo largo del eje de medición.

En algunos métodos anteriores, la influencia de las cargas axiales puede abordarse, en casos ideales, usando una configuración de sensor diferencial, en la que dos sensores se colocan en lados opuestos de la pala. Estos métodos pueden no ser lo suficientemente precisos cuando los sensores no pueden colocarse exactamente alineados a lo largo de la pala debido a la tolerancia de instalación o debido al diseño estructural de la pala. Los modelos menos sofisticados son aún más inadecuados cuando se usan tres o más sensores por pala.

Otro método anterior hace rotar el rotor mientras se mueven también otros componentes de la turbina. Sin embargo, en tales métodos, el procedimiento y/o los movimientos de prueba deben estar muy limitados con el fin de evitar cualquier pérdida de sustentación del rotor, lo que requiere un reinicio de prueba o una velocidad excesiva del rotor, que pueden dañar los componentes de turbina. Además, tales métodos habitualmente no pueden probarse usando un intervalo completo de movimiento de un componente de turbina sin sufrir cierta pérdida de sustentación, producir una velocidad excesiva o dañar el componente o la turbina.

En otro método anterior, se usa un modelo de carga más sofisticado, pero las mediciones solo se toman durante el funcionamiento normal de la turbina. Esto puede no permitir la prueba completa de todas las situaciones de carga posibles y, en cualquier caso, nuevamente no puede probarse el intervalo completo de movimiento, por razones similares a las del procedimiento de prueba anterior. Además, durante el funcionamiento normal de la turbina, todas las palas se operan a la vez. El documento US2009/0263246 es un ejemplo de la técnica anterior que trata de la calibración de sensores en una turbina eólica.

La presente invención tiene como objetivo abordar estos problemas y proporcionar mejoras sobre los dispositivos y métodos conocidos.

**50 Declaración de la invención**

Los aspectos y realizaciones de la invención se exponen en las reivindicaciones adjuntas.

En términos generales, una realización de un primer aspecto de la invención puede proporcionar un método para calibrar sensores de carga de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor, una pluralidad de palas de rotor y una pluralidad de sensores de carga asociados con las palas de rotor, comprendiendo el método, mientras el rotor está rotando: mover al menos una de las palas de rotor desde una primera posición de calibración a una segunda posición de calibración, en el que el número de dicha pluralidad de palas de rotor que se mueven es al menos una menos que el número de dicha pluralidad de palas de rotor; y medir los valores de carga de los sensores de carga. Dado que no todas las palas se mueven a las posiciones de calibración, el movimiento de estas palas (menos que el total) contribuye menos a los efectos aerodinámicos en el rotor y, por lo tanto, el rotor puede hacerse rotar de manera más consistente y segura, mientras sigue obteniendo el movimiento de calibración completo de la o las palas.

La turbina puede tener, por ejemplo, tres palas de rotor. El número de palas que se mueven, cambian, varían o modifican (de posición) o se maniobran, puede ser solo una de las palas. Los sensores asociados con las palas pueden ser un número común para cada pala, tal como uno o más para cada una de las mismas. Los sensores pueden disponerse en la raíz de la pala, para medir las cargas de pala. También, o como alternativa, pueden disponerse a lo largo de la longitud de la pala de rotor.

Convenientemente, la rotación o el giro del rotor se produce durante la marcha en vacío de la turbina eólica. Por ejemplo, puede usarse un procedimiento de calibración específico, por ejemplo, en el que se detiene el funcionamiento normal de la turbina y se entra en un estado de marcha en vacío de la turbina, en el que pueden realizarse las pruebas.

5 De acuerdo con la invención, la etapa de movimiento comprende cambiar el ángulo de cabeceo de la al menos una pala de rotor de un primer ángulo de cabeceo a un segundo ángulo de cabeceo, y la etapa de movimiento comprende mover la al menos una pala de rotor a través de una serie de posiciones de calibración. Por ejemplo, el movimiento o cabeceo de la pala puede ser a través de una serie de etapas de diferentes posiciones o ángulos de la pala.

10 En otra realización, la primera posición de calibración es una posición de calibración máxima para la pala de rotor, la segunda posición de calibración es una posición de calibración mínima para la pala de rotor y la etapa de movimiento comprende mover la al menos una pala de rotor continuamente entre las posiciones de calibración máxima y mínima. De esta manera, puede realizarse un barrido a través de las posiciones. En el caso del cabeceo de la pala, esto puede lograrse mediante un barrido de cabeceo a través de los posibles ángulos de cabeceo de la pala.

15 Convenientemente, el método comprende además mover al menos una de las palas de rotor, que no se mueve a una posición de calibración, a una posición de control.

20 Por lo tanto, en lugar de mantener una posición (desde el inicio o una etapa anterior de la prueba, o desde una posición de marcha en vacío), una pala que no se mueve para la calibración puede activarse o moverse para beneficiar o mejorar el procedimiento de prueba. Más de una pala (que no se mueve para la calibración) puede moverse de esta manera y en colaboración cuando sea necesario. Por ejemplo, en una turbina de tres palas en la que se mueve una pala para la calibración, las otras dos palas pueden moverse, juntas, de manera diferente o por separado.

25 Convenientemente, la etapa de mover la al menos una pala de rotor a una posición de control comprende mover la pala de rotor de control para controlar la velocidad de rotación del rotor. Por lo tanto, la pala o palas de repuesto o de control pueden moverse para garantizar que el rotor mantenga una cierta velocidad o no supere una velocidad máxima o mínima. Estas pueden garantizar que el rotor siga moviéndose durante una prueba, o que no supere una velocidad perjudicial o una velocidad que afectaría a los datos de manera significativa. Por ejemplo, la o las palas que no se mueven actualmente para la calibración pueden moverse a un ángulo de cabeceo que aumenta la velocidad de marcha en vacío rotacional del rotor.

30 En una realización, el método comprende: mover inicialmente toda la pluralidad de palas de rotor para controlar la velocidad de rotación del rotor; y, posteriormente, mover la al menos una pala de rotor desde la primera posición de calibración a la segunda posición de calibración, mientras se mueve la al menos una pala de rotor para controlar la velocidad de rotación del rotor.

35 De manera similar, al finalizar un procedimiento de prueba en una primera pala, todas las palas pueden volver a acoplarse para controlar la velocidad de rotación, por ejemplo, para evitar una pérdida de sustentación, detención o velocidad excesiva, antes de que se seleccione otra pala para la calibración.

40 En unas realizaciones, la al menos una pala de rotor, que se mueve desde la primera posición de calibración a la segunda posición de calibración, tiene al menos un sensor de carga asociado, y el método comprende, además: para el al menos un sensor de carga (o, en el caso de una pluralidad de sensores, cada uno de la pluralidad de sensores de carga), usar el valor de carga medido del sensor de carga para determinar los componentes de momento de aleta y de momento de borde axiales de la carga. En otras realizaciones, el valor de carga medido del sensor de carga puede usarse para determinar otras (u otras combinaciones de) fuerzas y momentos de la carga.

45 En unas realizaciones, el método comprende el uso de datos del sensor de carga (o, en el caso de una pluralidad de sensores de carga, de todos los sensores de carga) para calcular una estimación de carga, o una combinación de los componentes de carga, para la al menos una pala de rotor. En unas realizaciones, la al menos una pala de rotor tiene una pluralidad de sensores de carga asociados, por ejemplo, tres o cuatro.

50 Esto permite un cálculo de modelado más sofisticado, en el que se consideran los componentes de carga de las cargas de momento de aleta y de momento de borde de cada sensor, en lugar de cancelar estas cargas emparejando sensores, lo que puede ser inexacto. Además, en el cálculo se usan los datos de los tres o más sensores, de manera que, por ejemplo, pueda resolverse un modelo complejo con al menos tres incógnitas usando los valores obtenidos.

55 Una realización de un segundo aspecto de la invención puede proporcionar un método para calibrar sensores de carga de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica un rotor, una pluralidad de palas de rotor y al menos tres sensores de carga asociados con cada pala de rotor, comprendiendo el método, mientras el rotor está rotando: mover al menos una de las palas de rotor desde una primera posición de calibración a una segunda posición de calibración; medir los valores de carga de los sensores de carga; para cada uno de los al menos tres sensores de carga asociados con la al menos una pala de rotor, usar el valor de carga medido para determinar los componentes de momento de aleta y de momento de borde axiales de la carga; y usar datos de los al menos tres sensores de carga para calcular una estimación de carga para la al menos una pala de rotor.

Una realización de un tercer aspecto de la invención puede proporcionar un programa informático, o un medio legible por ordenador que comprende un código de programa informático, adaptado, cuando se carga o se ejecuta en un ordenador o un procesador, para hacer que el ordenador o el procesador realicen las etapas de un método como se ha descrito anteriormente.

Una realización de un cuarto aspecto de la invención puede proporcionar una turbina eólica que comprende: un rotor; una pluralidad de palas de rotor; una pluralidad de sensores de carga asociados con las palas de rotor; y un controlador configurado para controlar la turbina eólica para, mientras el rotor está rotando: mover al menos una de las palas de rotor desde una primera posición de calibración a una segunda posición de calibración, en el que el número de dicha al menos una de las palas de rotor que se mueven es al menos una menos que el número de dicha pluralidad de palas de rotor; y medir los valores de carga de los sensores de carga.

Los aspectos y las realizaciones anteriores pueden combinarse para proporcionar aspectos y realizaciones adicionales de la invención.

### Breve descripción de los dibujos

La invención se describirá a continuación a modo de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una vista esquemática de una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención;

la figura 2 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas de un método para calibrar sensores de carga de una turbina eólica de acuerdo con una realización de la invención; y

las figuras 3 a 5 son gráficas que muestran parámetros medidos durante la operación de un método de calibración de acuerdo con las realizaciones de la invención.

### Descripción detallada de las realizaciones

Las realizaciones de la invención proporcionan métodos mejorados para calibrar sensores de carga en turbinas eólicas, especialmente mediante un esquema de movimiento de las palas de rotor y usando más datos de los sensores de carga para informar sobre un modelo más sofisticado de las cargas.

La figura 1 es una vista esquemática de una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención. Una turbina eólica 10 comprende una torre 12 sobre la que se soporta una góndola 14. Un rotor 16 está montado en la parte delantera de la góndola 14. El rotor 16 comprende un buje 18 en el que están montadas tres palas de rotor equidistantes 20a, 20b, 20c. El rotor 16 incluye un sistema de cabeceo de pala capaz de variar el ángulo de cabeceo de cada pala de rotor 20a, 20b, 20c de manera independiente, por ejemplo, usando un accionamiento de cabeceo de pala eléctrico o hidráulico.

En esta realización, las palas de rotor 20a, 20b, 20c tienen, cada una de las mismas, una sección transversal sustancialmente cilíndrica en su extremo de raíz 22. La sección transversal cambia suavemente a un perfil aerodinámico en una posición de cuerda máxima como lo indica la línea A-A. A continuación, la cuerda disminuye progresivamente hacia la punta 24 de las palas de rotor 20a, 20b, 20c. Las palas de rotor 20a, 20b, 20c también se ahúsan gradualmente en espesor a lo largo de su longitud, moviéndose desde la raíz 22 hacia la punta 24. Por supuesto, son posibles otros perfiles de pala para su uso con las técnicas de calibración de la invención descritas en el presente documento.

Un sistema de detección de carga 26 se localiza cerca de un extremo de raíz 22 de la pala de rotor 20a. El sistema de detección de carga 26 comprende al menos un sensor de carga; en algunas realizaciones, puede proporcionarse más de un sensor, espaciados circunferencialmente alrededor de la raíz de pala.

En este caso, el sensor de carga está montado en una superficie interior de una carcasa de pala de rotor para protegerlo del entorno. En otras realizaciones, el sensor de carga puede montarse en la superficie exterior de la carcasa o integrarse dentro de la carcasa.

El sensor de carga está configurado para medir la deformación mecánica del extremo de raíz de la pala. Habitualmente, esto se logra usando algún tipo de galga extensométrica. En esta realización, el sensor de carga es una galga extensométrica óptica, de un tipo conocido en la técnica. Como las turbinas eólicas son estructuras muy altas, son susceptibles a los rayos, que pueden dañar la turbina eólica 10. El uso de sensores de carga ópticos elimina los componentes metálicos o eléctricamente conductores en las partes expuestas del rotor, reduciendo de este modo la vulnerabilidad de la pala de rotor 20a a los rayos.

En realizaciones alternativas, el o los sensores de carga pueden montarse en una posición diferente en la pala de rotor lejos de la raíz, por ejemplo, a lo largo de la longitud de la pala. Habitualmente, la posición se elige para medir la

deformación mecánica en esa parte de la pala. Por supuesto, los sensores pueden montarse en ambas, o más, posiciones.

5 Un conjunto optoelectrónico (no mostrado) se localiza alejado de la pala de rotor 20a, por ejemplo, en la góndola 14 o el buje 18 de la turbina eólica 10. El conjunto optoelectrónico y el sistema de cabeceo de pala de la turbina eólica están conectados a un controlador (no mostrado). El sensor de carga se conecta con el conjunto optoelectrónico mediante fibras ópticas como es habitual en la técnica. El conjunto optoelectrónico comprende además una fuente de luz y un detector de luz conectado al sensor de carga. En realizaciones con más de un sensor de carga, la fuente de luz está conectada al primer sensor de carga de la serie, y el detector de luz está conectado al último sensor de carga de la serie.

15 El controlador incluye una memoria en la que se almacena el software de control y un procesador para ejecutar el software de control. El software de control dirige la operación del sensor de carga y el sistema de cabeceo de pala. Como se describirá con mayor detalle a continuación, el software de control controla, mientras el rotor está rotando, el movimiento de al menos una de las palas de rotor desde una primera posición de calibración a una segunda posición de calibración, y la medición de los valores de carga de los sensores de carga.

20 La figura 2 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas (200) de un método para calibrar sensores de carga de una turbina eólica de acuerdo con una realización de la invención.

Inicialmente, se ordena la marcha en vacío de la turbina eólica (202). Una vez que marcha en vacío, se solicita el modo manual y se inicia la prueba (204). El punto de operación se caracteriza por no haber producción de energía desde la turbina. Las palas se inclinan conjuntamente hasta la posición de "marcha en vacío", por ejemplo, 78 grados.

25 La recopilación y calibración de datos comienza tras la orden. Esta última puede generarse automáticamente una vez que se alcanza el estado de marcha en vacío o activarse manualmente desde, por ejemplo, un panel de operador o mediante una o unas aplicaciones remotas.

30 La prueba comienza operando la turbina con el fin de controlar la velocidad del generador (o, como alternativa, el rotor) a un nivel de referencia predefinido (206). La referencia puede elegirse en función de la velocidad del viento medida (por ejemplo, a partir de una tabla de consulta) o ser un parámetro constante. Como resultado, las palas se inclinan conjuntamente en un bucle cerrado, de manera que la velocidad del viento incidente proporcione suficiente velocidad de rotor para alcanzar la referencia de velocidad deseada.

35 Una vez que se ha alcanzado la velocidad, se espera que la referencia de cabeceo conjunto se establezca (208) alrededor de un valor estable. Se afirma que las posiciones de las palas están "estabilizadas" cuando la referencia de cabeceo conjunto usada para el control de velocidad ya no cambia.

40 A continuación, se elige una pala (210). Esta pala se inclina hacia la referencia de cabeceo máximo (212) establecida para la prueba, en general, cerca de o igual a 90 grados. Cuando se alcanza la referencia de cabeceo (214), el sistema espera a que el rotor realice un número predefinido de rotaciones (216). El número de rotaciones puede estar en función del ángulo de cabeceo y puede ser un número entero o una fracción de las rotaciones completas.

45 Si la referencia de cabeceo actual no es igual a la referencia de cabeceo mínimo para la prueba (218), a continuación, la referencia de cabeceo se reduce un tamaño de escalón (220) y se repite el procedimiento. La pala se inclina hacia la referencia (214), se espera que pasen las rotaciones de rotor (216), y se repite la comprobación del cabeceo mínimo (218). El número de escalones, la velocidad de rampa y la referencia de cabeceo mínimo/máximo pueden ajustarse. En una alternativa, el cambio de cabeceo es continuo, con mediciones continuadas en todo el intervalo de cabeceo, en lugar de modificar el cabeceo en etapas.

50 Cuando se alcanza la referencia de cabeceo mínimo para la prueba (218), el sistema espera de nuevo (indicado como "Pausa" en la figura 2) a que el rotor realice un número predefinido de rotaciones. De nuevo, el número de rotaciones puede estar en función del ángulo de cabeceo y puede ser un número entero o una fracción de las rotaciones completas. A continuación, se completa la prueba para la pala actual; por lo tanto, la pala se inclina de nuevo a donde estaba cuando comenzó la prueba (222). En este punto, el control de velocidad (206) se habilita de nuevo y se inicia la prueba para otra pala. El control de velocidad es necesario de nuevo, ya que la velocidad del viento podría haber cambiado y/o la velocidad de rotor (o generador) podría haber cambiado durante la prueba como resultado del movimiento de cabeceo individual de pala ordenado por la prueba. Por lo tanto, los cabeceos de las palas se controlan conjuntamente de nuevo para gestionar la velocidad del rotor a un nivel satisfactorio antes de estabilizar (208) y seleccionar la siguiente paleta a probar (210).

65 La figura 3 es una gráfica que muestra los parámetros medidos durante la operación de este método de calibración de acuerdo con una realización de la invención. Las gráficas 302, 304 y 306 indican las posiciones de cabeceo para las tres palas de la turbina, mientras que la gráfica 308 indica la posición o azimut de rotor, y la gráfica 310 indica la velocidad de rotor.

Como puede verse en el primer período de las gráficas 302, 304 y 306, las palas se inclinan conjuntamente 30 grados, aproximadamente, para alcanzar el punto de ajuste de velocidad deseado, como se muestra en la gráfica de velocidad 310. Una vez que la velocidad está en un punto satisfactorio, es decir, el cabeceo de la primera pala de prueba hasta su ángulo máximo (produciendo la velocidad de rotor mínima para esa pala) no hará que el rotor pierda sustentación (es decir, la velocidad mínima lograda por medio de los ángulos de cabeceo mantenidos de las dos palas restantes será mayor que cero), pueden iniciarse las pruebas. A continuación, la pala A (302) se inclina 90 grados y comienza la escalera descendente de escalones hacia las referencias entre 90 grados y el mínimo. Para cada escalera, se espera que pase media rotación (como puede verse en la gráfica de seguimiento de rotación 308) antes de descender al siguiente escalón. Una vez que se alcanza 0 grados para la pala A y se pasa media rotación, la prueba de la pala A finaliza y la pala A se inclina de nuevo aproximadamente 30 grados. Una vez que se logra de nuevo la velocidad mínima, la siguiente pala, B, puede seguir el mismo proceso.

Una vez que se recopilan los datos para el intervalo de ángulos de cabeceo para todas las palas durante la rotación de marcha en vacío, los datos recopilados por cada uno de los sensores de carga de las palas pueden procesarse para descubrir los valores de calibración. El procedimiento de procesamiento de datos determina el conjunto de valores de calibración que mapean el desplazamiento medido desde el sensor de carga de pala hasta los momentos de flexión de aleta de pala. Cabe señalar que el procesamiento de datos puede producirse al mismo tiempo con la recopilación de datos o, como alternativa, fuera de línea.

Un ejemplo del cálculo de las cargas, usando los valores de sensor de galga extensométrica, se describe a continuación.

La tensión es una medida de ingeniería útil debido a que relaciona las fuerzas que actúan sobre un objeto (por ejemplo, gravedad, centrífuga, flexión, torsión) con el movimiento físico que puede medirse con un sensor de tensión (también conocido como galga extensométrica). Aquí se hará referencia a las definiciones de la siguiente tabla:

Símbolo	Definición
L	Longitud
$\epsilon$	Tensión
K	Ganancia/coeficiente de proporcionalidad
O	Compensación
Sensor	Valor medido del sensor
$\alpha$	Coeficiente de expansión térmica (CTE)
T	Temperatura
F	Fuerza
M	Momento
A	Área de sección transversal de la pala
E	Módulo de Young de la pala
I	Área de sección transversal de la pala
y	Distancia del sensor al eje neutro de pala

Por definición, la tensión ( $\epsilon$ ) es una medida normalizada del desplazamiento de dos puntos con respecto a una longitud de referencia. Dicho de otra manera, la tensión es la cantidad de deformación (expansión o compresión) de un material con respecto a su longitud original y, por lo tanto, no tiene unidades.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_{Nueva} - L_{Original}}{L_{Original}}$$

Dependiendo del tipo de sensor de tensión y su tecnología subyacente, normalmente habrá un coeficiente de proporcionalidad (es decir, factor de escala) desde la salida de sensor hasta la tensión. También puede haber una compensación heredada del sensor o debida al proceso de instalación. Por lo tanto, el modelo genérico de un sensor de tensión es:

$$\epsilon_{Medida} = K_{Sensor} \cdot Sensor + O_{Sensor}$$

Un cambio de temperatura también provocará una expansión/contracción térmica del propio sensor (además del objeto que se está midiendo). Esta tensión térmica será proporcional al cambio de temperatura por el coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ).

$$\epsilon_{Térmica} = \alpha_{Sensor} \Delta T = \alpha_{Sensor} (T_{Actual} - T_{Referencia})$$

Por lo tanto, el sensor medirá tanto la tensión mecánica debida a la carga aplicada como la tensión térmica provocada

por el cambio de temperatura.

$$\varepsilon_{Medida} = \varepsilon_{Mecánica} + \varepsilon_{Térmica}$$

$$K_{Sensor}Sensor + O_{Sensor} = \varepsilon_{Mecánica} + \alpha(T_{Actual} - T_{Referencia})$$

$$\varepsilon_{Mecánica} (Sensor) = K_{Sensor}Sensor + O_{Sensor} - \alpha_{Sensor}(T_{Actual} - T_{Referencia})$$

- 5 La pala está sometida a fuerzas provocadas por su propia masa y por la aerodinámica. Dependiendo de la posición de la pala, la velocidad de rotor y la velocidad y dirección del viento, estas fuerzas se combinan para producir momentos de flexión de aleta y de borde y una fuerza axial total. Estas cargas que provocan tensión en la pala (además del cambio de temperatura) pueden representarse genéricamente por:

$$\varepsilon_{Pala} = \varepsilon_{Axial} + \varepsilon_{Flexióndealeta} + \varepsilon_{Flexióndeborde} + \varepsilon_{Térmica}$$

- 10 La tensión axial puede calcularse mediante:

$$\varepsilon_{Axial} = \frac{F_{Axial}}{EA}$$

- 15 Tanto E como A dependen del diseño de pala (más las tolerancias de producción) y la localización de la medición. E y A pueden agruparse y resolverse durante la calibración. Por lo tanto, la tensión axial puede representarse genéricamente por:

$$\varepsilon_{Axial} \Rightarrow K_{Axial}F_{Axial}$$

- 20 La tensión por flexión (ya sea de aleta o de borde) puede calcularse mediante:

$$\varepsilon_{Flexión} = \frac{My}{EI}$$

Tanto E como I dependen del diseño de pala (más las tolerancias de producción). E, I e y dependen de la localización de la medición y pueden agruparse y resolverse durante la calibración. Por lo tanto, la tensión por flexión puede representarse genéricamente por:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Flexióndealeta} &= K_{Aleta}M_{Aleta} \\ \varepsilon_{Flexióndeborde} &= K_{Borde}M_{Borde} \end{aligned}$$

- 25

La tensión térmica provocada por un cambio de temperatura de la pala puede calcularse mediante:

$$\varepsilon_{Térmica} = \alpha_{Pala}\Delta T = \alpha_{Pala}(T_{Actual} - T_{Referencia})$$

- 30 La combinación de todas estas ecuaciones de tensión en un punto específico de la pala produce el siguiente modelo genérico para la pala:

$$\varepsilon_{Mecánica} (Pala) = K_{Axial}F_{Axial} + K_{Aleta}M_{Aleta} + K_{Borde}M_{Borde} + \alpha_{Pala}(T_{Actual} - T_{Referencia})$$

- 35 Los parámetros desconocidos en los modelos detallados anteriormente pueden descubrirse recopilando datos mientras la turbina está operando de una manera específica en ciertas condiciones climáticas. Cualquier calibración es tan buena como la referencia, la calidad de los datos y lo bien que esté modelado el sistema.

- 40 El estimador de cargas de pala de las realizaciones de la invención se ha desarrollado para estimar las fuerzas relevantes y los momentos de flexión en las palas basándose en el tiempo real usando señales de turbina tales como el cabeceo de pala, el azimut de pala, la velocidad de rotor y la velocidad del viento. Las cargas estimadas se usarán como la referencia de calibración.

- 45 La fuerza axial está bien caracterizada por el estimador. La velocidad de rotor y el azimut de pala determinan las fuerzas centrípeta y gravitacional, que son las dos fuerzas axiales principales. La velocidad del viento y el cabeceo de pala tienen muy poca influencia (prácticamente insignificante) sobre la fuerza axial.

- 50 Los momentos de flexión de aleta y de borde, por otro lado, suelen estar directamente vinculados con el cabeceo de pala, el azimut de pala y la velocidad del viento. Los momentos de flexión provocados por la masa de la propia pala (ignorando las cargas aerodinámicas) pueden caracterizarse bien por un modelo no aerodinámico. Este modelo

funciona bien durante una marcha en vacío lenta y con bajas velocidades del viento, mientras que el empuje de las palas es bajo. También se ha incorporado un estimador de cargas aerodinámicas basado en la velocidad y la potencia del viento para estimar el empuje en las palas, lo que permite la calibración a velocidades del viento más altas y mejora el ajuste general del modelo.

5 Usando los modelos para la tensión medida por el sensor y la tensión de la carga en las palas, la ecuación completa durante la calibración para cada sensor se convierte en:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Mecánica} (Sensor) &= \varepsilon_{Mecánica} (Pala) \\ K_{Sensor} Sensor + O_{Sensor} - \alpha_{Combinado} (T_{Actual} - T_{Referencia}) \\ &= K_{Axial} F_{Axial} + K_{Aleta} M_{Aleta} + K_{Borde} M_{Borde} \\ K_{Sensor} Sensor - \alpha_{Combinado} (T_{Actual} - T_{Referencia}) \\ &= [F_{Axial} \quad M_{Aleta} \quad M_{Borde} \quad -1] \begin{bmatrix} K_{Axial} \\ K_{Aleta} \\ K_{Borde} \\ O_{Sensor} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

10 El coeficiente de expansión térmica usado anteriormente es un término combinado específico para el tipo de sensor, la unión a la pala y la localización en la pala. El valor puede calcularse a partir de las propiedades del material, pero idealmente se descubre a través de pruebas.

15 Para cada sensor, los parámetros desconocidos en el lado derecho de la ecuación pueden resolverse usando algoritmos tomados de la teoría de la estimación, tales como los mínimos cuadrados ordinarios o el filtro de Kalman. La fuerza axial y los momentos de flexión de aleta y de borde vendrán del estimador.

20 Para lograr la mejor solución numérica, los datos de calibración deben estimular adecuadamente todos los componentes de tensión individuales. Dicho de otra manera, la fuerza axial y los momentos de flexión de aleta y de borde deben tener contenido dinámico con el fin de tener una solución válida. Por ejemplo, si la pala se mantiene en una posición fija de aleta, entonces el momento de flexión de borde sería mínimo y la ganancia resultante no sería fiable. Por lo tanto, la pala debe colocarse tanto en posición de aleta como de borde para la calibración.

25 Esto puede lograrse de manera eficiente realizando un barrido de cabeceo, tal y como se ha descrito en el presente documento, durante una marcha en vacío lenta. Esto proporcionará una fuerza axial y unos momentos de flexión de aleta y de borde variables. La velocidad del viento debe mantenerse lo más baja posible y debe realizarse al menos una rotación completa del rotor para capturar mínimos y máximos.

30 El uso de este método implica que no hay necesidad de que los valores de los componentes axiales se asuman o modelen de una manera básica como en los métodos anteriores; el método actual, que usa el movimiento (barrido de cabeceo) de la pala mientras rota, proporciona los tres componentes (axial, de aleta, de borde) de los datos necesarios, de cada sensor individual en la pala. Tampoco es necesario un modelo que use pares de sensores dispuestos a lo largo de los ejes de las palas con el fin de cancelar un componente de las fuerzas, como es habitual en la técnica.

35 Durante la calibración, es importante que las palas estén rotando. Para evitar que el rotor se detenga a velocidades de viento muy bajas, puede implementarse un control de velocidad simple en el que el rotor se lleve a una velocidad inicial adecuada antes de iniciar la secuencia de cabeceo. Como se ha indicado anteriormente, esto puede lograrse inclinando las tres palas hasta que se alcance la velocidad mínima, bloqueando a continuación el cabeceo de las dos palas que no se están calibrando. Durante la secuencia de cabeceo, la velocidad de rotor se desviará debido al cabeceo y la velocidad del viento variable. Después de calibrar una pala, las palas vuelven a inclinarse, si fuera necesario, para restablecer la velocidad de rotor y el ciclo se repite hasta que todas las palas estén calibradas. La calibración puede interrumpirse si la velocidad de rotor supera un umbral de seguridad que podría producirse si la velocidad del viento aumentase rápidamente durante la secuencia de cabeceo.

45 El procesamiento de datos de acuerdo con una realización de la invención se divide en macroetapas.

1. Determinar las cargas no aerodinámicas y aerodinámicas estimadas que actúan sobre la pala como se ha descrito anteriormente. Estas son los momentos de flexión de aleta/borde y la fuerza axial.

50 El modelo empleado se basa en leyes físicas simples y, por lo tanto, está en función de la posición de azimut de pala medida, el ángulo de cabeceo, la velocidad de rotor y de las propiedades geométricas del rotor y la góndola, tales como la distribución de masa de la pala, el centro de gravedad de la pala y el ángulo de inclinación de la góndola, y la concicidad de la pala/buje.

55 2. Conociendo la posición del sensor en la pala, pueden descubrirse los momentos de flexión y la fuerza axial

estimados para la posición exacta del sensor.

3. Compensar la lectura de sensor medida para cualquier expansión/compresión inducida por temperatura usando la temperatura medida o estimada en la localización del sensor.

5

$$Tensión_{TempCompensada} = K_{Sensor} \cdot Sensor_{Medida} - \alpha_{Combinado} (T_{Actual} - T_{Referencia})$$

donde  $K_{Sensor}$  es el coeficiente de proporcionalidad (es decir, el factor de escala) para convertir la medición de sensor en tensión.

10 4. Descubrir los valores de calibración del sensor de carga de pala  $K_{Axial}$ ,  $K_{Aleta}$ ,  $K_{Borde}$ ,  $O_{Sensor}$  para el modelo:

$$Tensión_{TempCompensada} = [F_{Axial} \quad M_{Aleta} \quad M_{Borde} \quad -1] \begin{bmatrix} K_{Axial} \\ K_{Aleta} \\ K_{Borde} \\ O_{Sensor} \end{bmatrix}$$

donde  $F_{Axial}$ ,  $M_{Aleta}$  y  $M_{Borde}$  son las cargas estimadas.

15 La figura 4 muestra un ejemplo de trayectoria para las cargas relevantes como funciones de la escalera descendente en la referencia de cabeceo, a medida que la pala se inclina hasta 80 grados y, a continuación, desciende a 0 grados. Las gráficas muestran, respectivamente, el ángulo de cabeceo (402), el momento de flexión de aleta de pala (404), el momento de flexión de borde de pala (406) y la fuerza axial de pala (408). Las cargas de aleta y de borde y la fuerza axial están influenciadas por el ángulo de azimut de rotor; las formas generalmente sinusoidales de las gráficas siguen la rotación del rotor, a medida que la gravedad actúa sobre la pala. Puede verse que la amplitud de la fuerza axial de la pala es, en general, constante (408) a lo largo del barrido de cabeceo. Sin embargo, el cabeceo decreciente hace que las cargas de aleta disminuyan y las cargas de borde aumenten, tal como era de esperar.

20

25 Téngase en cuenta que, como alternativa, el problema de ajuste puede plantearse en función de la posición de la pala dentro del rotor, eliminando de este modo la dependencia del tiempo.

El ajuste real de los parámetros puede realizarse resolviendo un problema de mínimos cuadrados (LS) en el que los parámetros de calibración se ajustan hasta que se minimiza el error de ajuste de curva. Este método opera en todos los datos de sensor medidos y de carga estimados recopilados durante el cabeceo de pala. También puede usarse un enfoque iterativo (LSiter), en cuyo caso se usa el método de mínimos cuadrados en secciones de los datos y, a continuación, se combina para lograr un ajuste de error mínimo.

30

Una implementación alternativa es con un filtro de Kalman, ya sea en línea o fuera de línea usando los datos recopilados. La ventaja del enfoque en línea es que no es necesario almacenar/recopilar datos en la memoria, que es limitada en muchos ordenadores; los parámetros de calibración se ajustan en tiempo real durante el cabeceo de pala hasta que se alcanza la convergencia. En el enfoque fuera de línea, los datos recopilados se pasan al filtro de Kalman al igual que en el enfoque en línea, pero con la ventaja de poder usar un pase más suave o hacia atrás.

35

La figura 5 muestra un ejemplo de salida de calibración para las diferentes metodologías expuestas. Puede verse cómo un algoritmo de calibración en línea (Kalman en línea, la línea que se desvía en oposición a las otras líneas rectas) convergería hacia los valores verdaderos mientras que una contraparte fuera de línea (LS, LSiter) generará un valor basado en toda la recopilación de datos. Los valores de calibración se comparan con los valores "verdaderos" (línea continua). Las gráficas de la figura 5 muestran el ángulo de cabeceo de pala (502),  $K_a$  (504 - fuerza axial de pala hasta tensión),  $K_b$  (506 - momento de flexión de pala hasta tensión),  $K_e$  (508 - momento de borde de pala hasta tensión) y Compensación (510 - compensación de desplazamiento del sensor de carga de pala).

45

Los expertos en la materia apreciarán que la invención se ha descrito solo a modo de ejemplo y que pueden adoptarse una diversidad de enfoques alternativos sin alejarse del alcance de la invención, como se define en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Un método para calibrar sensores de carga (26) de una turbina eólica (10), comprendiendo la turbina eólica (10) un rotor (16), una pluralidad de palas de rotor (20a, 20b, 20c) y una pluralidad de sensores de carga (26) asociados con las palas de rotor (20a, 20b, 20c),
- 10 comprendiendo el método, mientras el rotor (16) está rotando:  
 mover al menos una de las palas de rotor (20a, 20b, 20c) desde una primera posición de calibración a una segunda posición de calibración a través de una serie de posiciones de calibración modificando un ángulo de cabeceo de la al menos una pala de rotor en etapas;  
 en el que el número de dicha al menos una de las palas de rotor que se mueven es al menos una menos que el número de dicha pluralidad de palas de rotor; y  
 en cada posición de calibración de la serie de posiciones de calibración, esperar que el rotor realice un número predefinido de rotaciones y medir los valores de carga de los sensores de carga (26).
- 15 2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la rotación del rotor (16) es durante la marcha en vacío de la turbina eólica (10).
- 20 3. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende además mover al menos una de las palas de rotor (20a, 20b, 20c), que no se mueve a una posición de calibración, a una posición de control.
- 25 4. Un método de acuerdo con la reivindicación 3, en el que la etapa de mover la al menos una pala de rotor (20a, 20b, 20c) a una posición de control comprende mover la pala de rotor de control (20a, 20b, 20c) para controlar la velocidad de rotación del rotor (16).
- 30 5. Un método de acuerdo con la reivindicación 4, comprendiendo el método:  
 mover inicialmente toda la pluralidad de palas de rotor (20a, 20b, 20c) para controlar la velocidad de rotación del rotor (16); y  
 mover posteriormente la al menos una pala de rotor (20a, 20b, 20c) desde la primera posición de calibración a la segunda posición de calibración, mientras se mueve la al menos una pala de rotor (20a, 20b, 20c) para controlar la velocidad de rotación del rotor (16).
- 35 6. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que la al menos una pala de rotor, que se mueve desde la primera posición de calibración a la segunda posición de calibración, tiene al menos un sensor de carga asociado, y comprendiendo el método, además:  
 usar el valor de carga medido del al menos un sensor de carga asociado para determinar los componentes de momento de aleta y de momento de borde axiales de la carga.
- 40 7. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el número predefinido de rotaciones está en función del ángulo de cabeceo.
- 45 8. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el número predefinido de rotaciones es un número entero o una fracción de las rotaciones completas.
- 50 9. Un programa informático, o un medio legible por ordenador que comprende un código de programa informático, adaptado, cuando se carga o se ejecuta en un ordenador o un procesador, para hacer que el ordenador o el procesador realice las etapas de un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
- 55 10. Una turbina eólica (10) que comprende:  
 un rotor (16);  
 una pluralidad de palas de rotor (20a, 20b, 20c);  
 una pluralidad de sensores de carga (26) asociados con las palas de rotor (24); y  
 un controlador configurado para realizar las etapas de un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

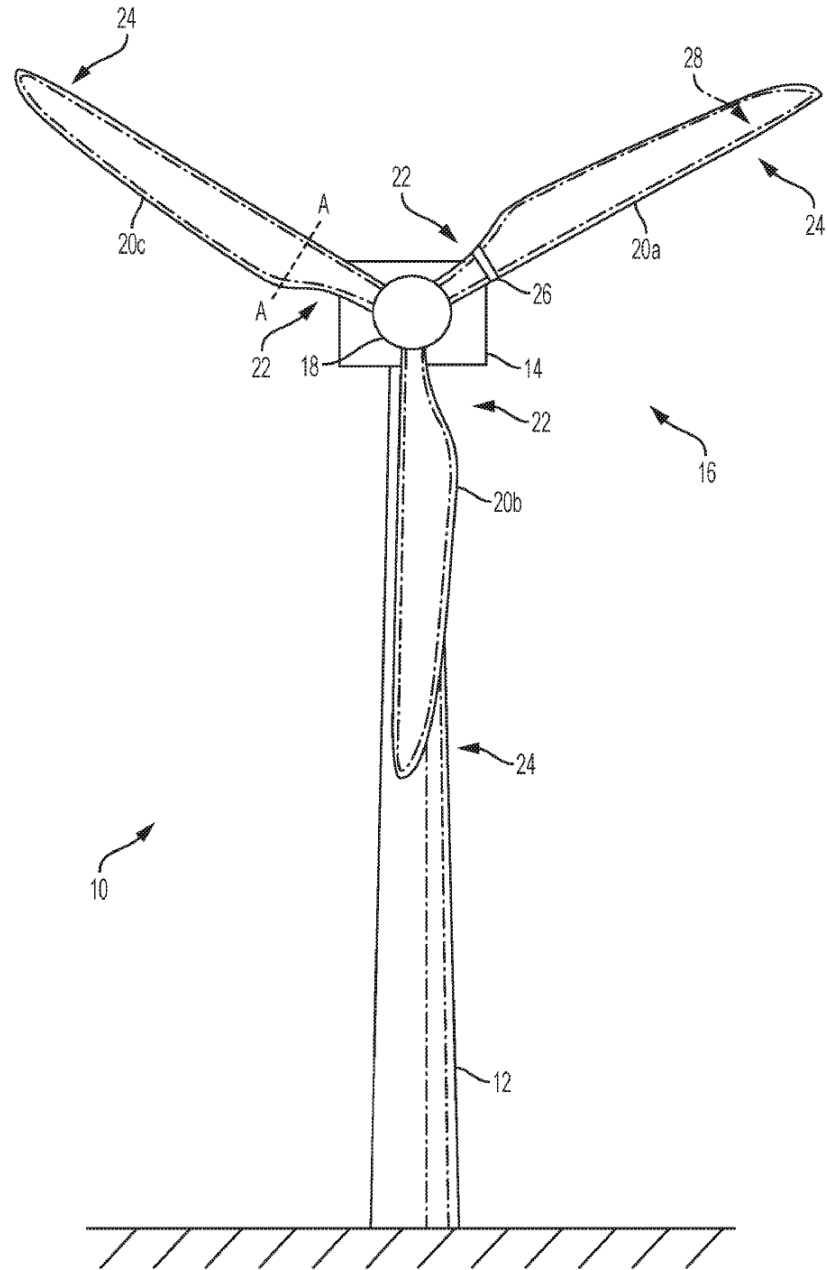


Figura 1

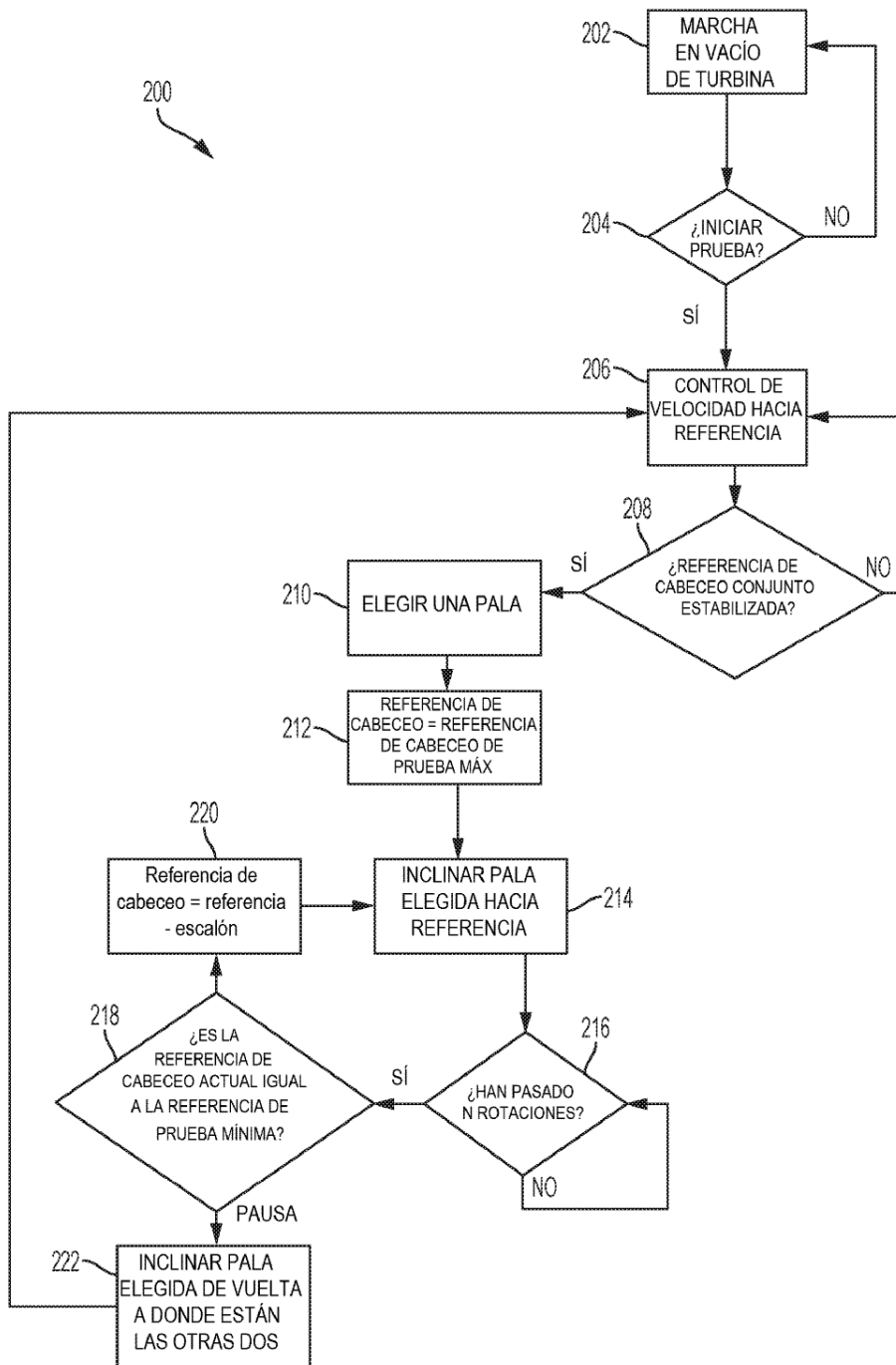


Figura 2

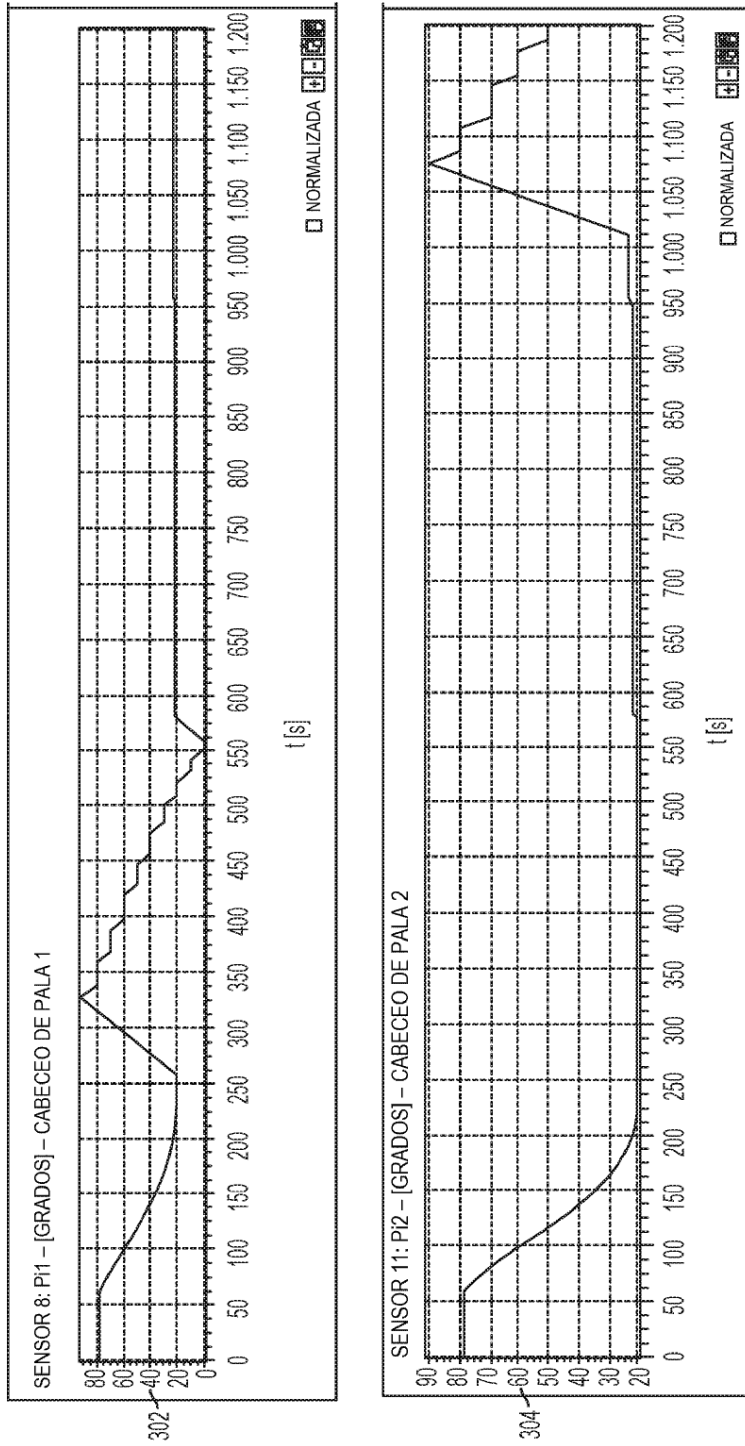


Figura 3

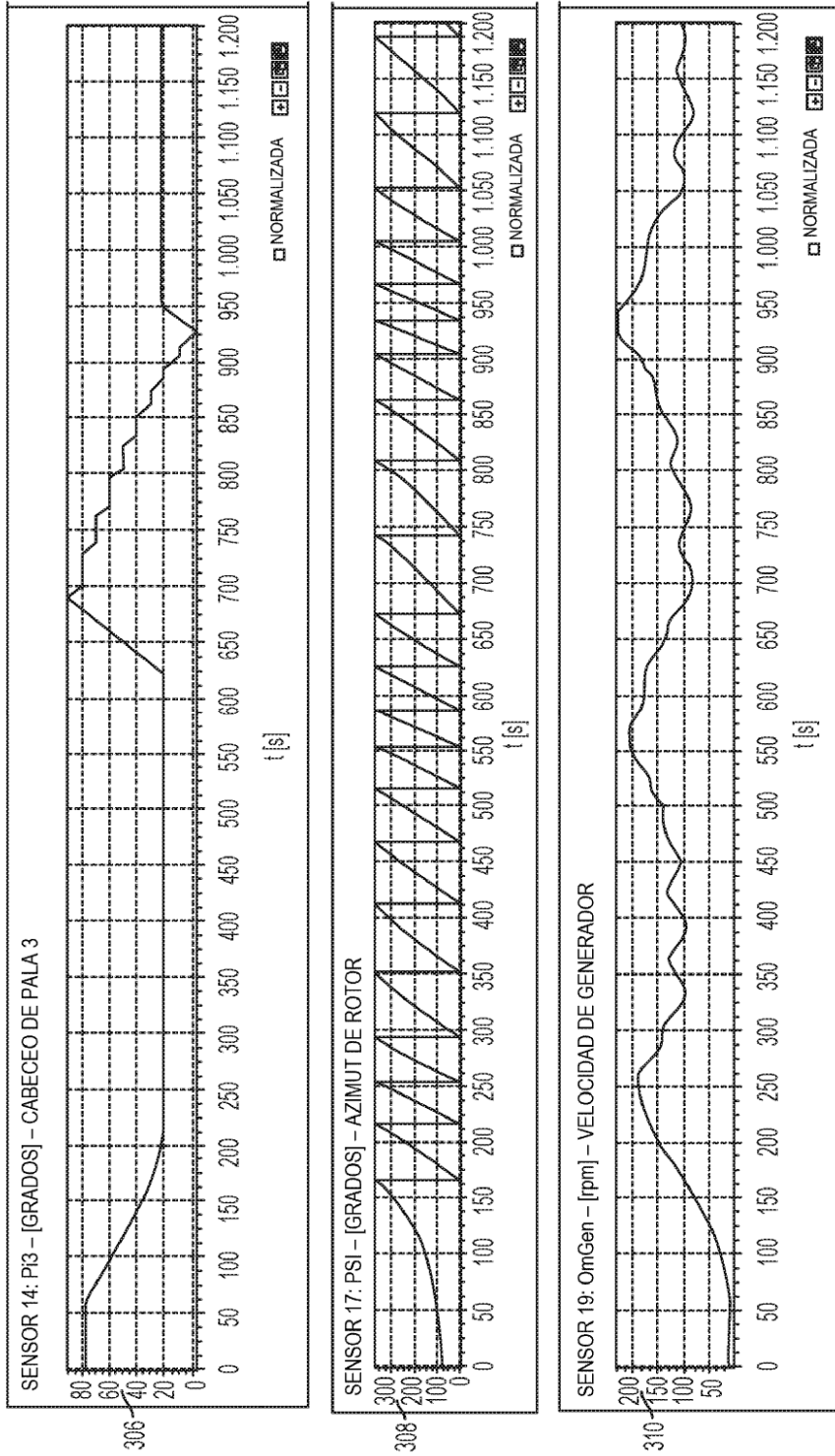


Figura 3 Cont.

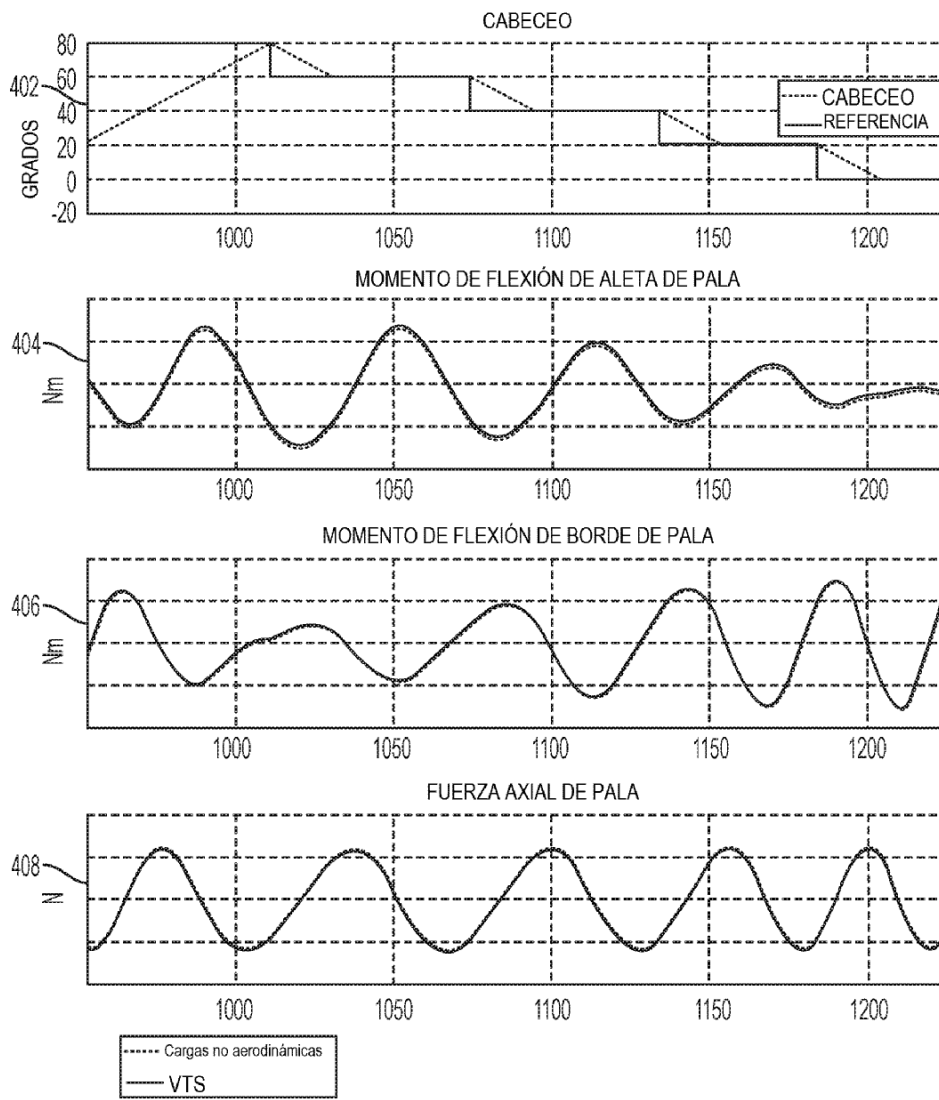


Figura 4

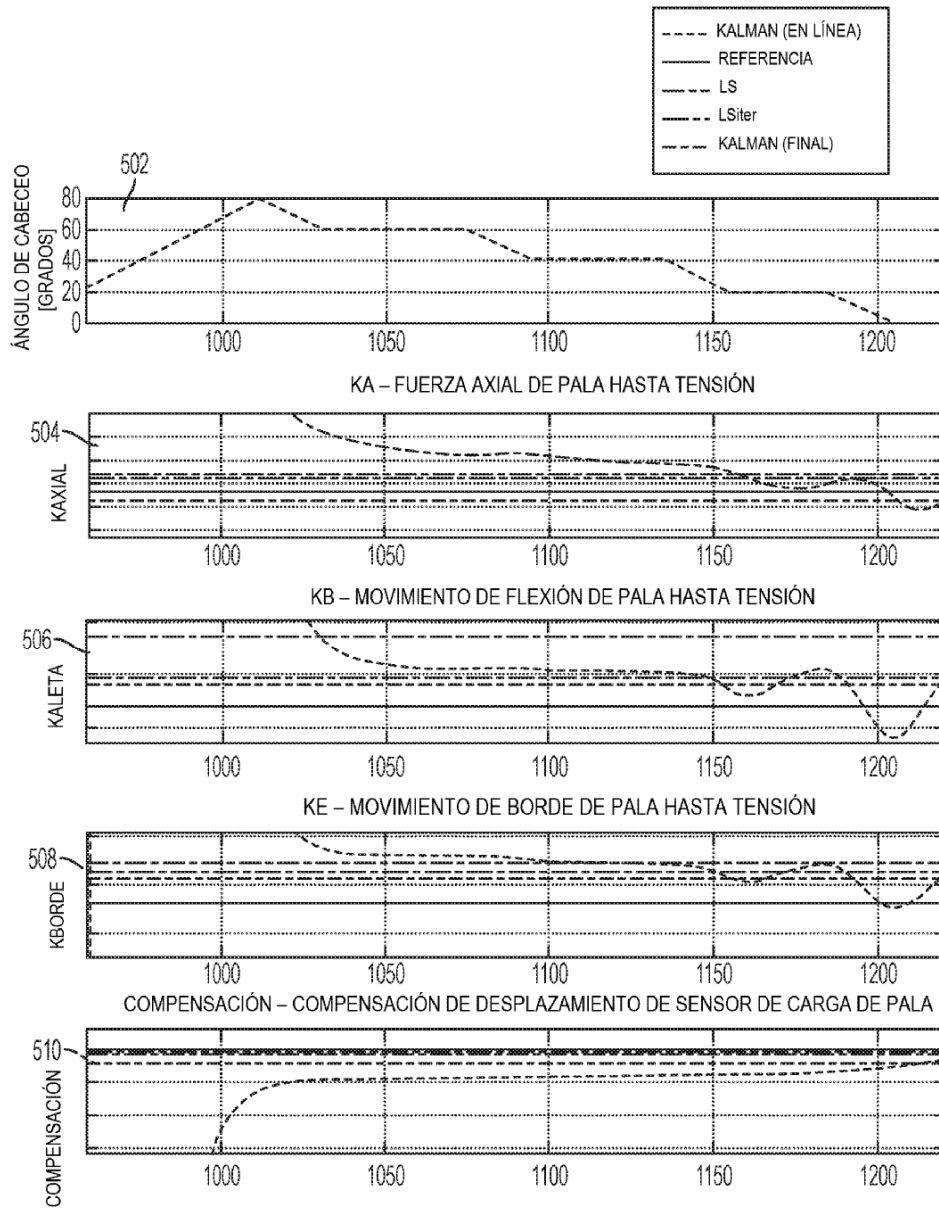


Figura 5