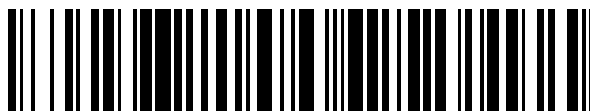


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 888 624**

51 Int. Cl.:

F03D 1/06 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.06.2016** **PCT/DK2016/050220**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.01.2017** **WO17000960**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.06.2016** **E 16734183 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.09.2021** **EP 3317513**

54 Título: **Método de medición de carga en una turbina eólica**

30 Prioridad:

30.06.2015 DK 201570417

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

05.01.2022

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

THØGERSEN, MORTEN;

CAPONETTI, FABIO y

HILTON, DAN

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 888 624 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 de medición de carga en una turbina eólica

5 Campo de la invención

Esta invención se refiere a un método de medición de carga en una turbina eólica, y una turbina eólica para tal medición de carga.

10 Antecedentes de la invención

La carga en 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 comúnmente en turbinas eólicas, normalmente en las palas de rotor. Estos sensores son necesarios para proporcionar mediciones precisas de las cargas en la

15 turbina, y los sensores también requieren calibración regular para determinar y rastrear cualquier desplazamiento entre los valores medidos por los sensores, y las cargas reales en los componentes de turbina. El documento EP2354538 describe un método para calibrar sensores de carga *in situ* en una turbina eólica de eje horizontal.

En un sistema considerado previamente para medir cargas en una turbina eólica, hay un único sensor en cada pala de rotor. Mide el momento de flexión solo en la dirección de "aleta" o "en el sentido de la aleta".

En otro sistema anterior hay cuatro sensores que pueden medir momentos de flexión en las direcciones tanto en el sentido del borde como en el sentido de la aleta. Los sensores están montados en la raíz de la pala y están alineados con los principales ejes de momento de flexión, "aleta" y "borde", como se muestra en la figura 3, una sección transversal en la raíz de un conjunto de pala de rotor. El conjunto de pala de rotor (300) tiene una sección de pala

25 externa, indicada por líneas de puntos 304, y una raíz de pala, que tiene una circunferencia 302. Los cuatro sensores (306) están montados en la circunferencia de la raíz de pala. Un primer par de sensores están montados en alineación con y en extremos opuestos del eje de momento de flexión de borde (308), el eje a través de los bordes delantero y trasero de la pala. El segundo par está montado en alineación con y en extremos opuestos del eje de aleta (310), ortogonal con respecto al eje de borde.

Tener dos sensores por eje permite que se use medición diferencial para anular las fuerzas axiales (es decir, de gravedad y centrífuga) y proporcionan un momento de flexión más puro.

Los diseños de pala han creado problemas con el montaje de los sensores a lo largo de los ejes principales (por ejemplo, palas de cubierta estructural con un alma interna). También puede haber otro hardware, o el conductor de rayos típico que obstruye la alineación de los sensores. Implementaciones anteriores para la calibración y el funcionamiento de los sensores de carga de pala han requerido que los sensores se coloquen a lo largo de los principales ejes de momento de flexión, con el fin de proporcionar una medición y calibración precisas. Por lo tanto,

40 han incorporado imprecisiones, y no son suficientemente flexibles con respecto al desarrollo futuro. También pueden ser costosos, debido al número de sensores requeridos, y la complejidad de instalación y mantenimiento.

Otros sistemas anteriores han usado pares de sensores en diferentes posiciones, tal como cada uno en los ejes de borde y aleta, o un par alineado con un eje con un único sensor en el otro. Sin embargo, estos requieren que los sensores estén alineados con los ejes principales, o al menos emparejados en paralelo a un eje, ya que resuelven fuerzas de manera independiente en cualquiera de las direcciones en el sentido del borde o en el sentido de la aleta.

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

50 Declaración de la invención

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

55 Una realización de un primer aspecto de la invención proporciona un método según la reivindicación 1.

La medición de ambas componentes de aleta y borde usando el mismo sensor permite el uso de sensores que están fuera del eje, que no requieren alineación con uno de los ejes de borde o de aleta. El sensor puede estar en una posición distante con respecto al eje/a los ejes, o significativa o sustancialmente fuera del eje, o no alineado con uno u otro eje. El sensor también puede no formar parte de un par diferencial de sensores.

60 Que el/los sensor(es) esté(n) fuera del eje significa que los sistemas de turbina pueden ser más tolerantes a la colocación del sensor, ya que los sensores pueden colocarse alrededor de obstáculos que ocultan la alineación con los ejes. Esto a su vez reduce las visitas de mantenimiento para reinstalar sensores. Menos componentes de competición/obstrucción también pueden conducir a unas vidas útiles más largas del componente y del sensor.

El hecho de que las componentes de aleta y borde de la carga sean medibles puede significar que son estimables o lo suficientemente significativos como para ser medibles/medidos. Las componentes de aleta y borde de la carga pueden ser comparables en magnitud, lo que puede significar que son de una magnitud que puede compararse, o que es factible comparar, o lo suficientemente significativos como para comparar. Por ejemplo, las componentes pueden ser de un orden de magnitud similar. La distancia fuera del eje determinará la magnitud de la componente secundaria o la menor de las dos componentes en la posición dada. La posición del sensor fuera del eje puede definirse por una carga mínima en el eje o dirección secundaria.

En realizaciones, la etapa de usar el valor de carga medido comprende usar el valor de carga de solo ese sensor para determinar las componentes de momento de flexión tanto de aleta como de borde, o una estimación (usando ese sensor solamente) de ambas componentes.

Adecuadamente, el al menos un sensor de carga está ubicado en una posición en la pala de rotor en un ángulo radial mínimo desde una intersección del eje de momento de flexión de aleta y el eje de momento de flexión de borde de la pala de rotor. Por ejemplo, el ángulo delimitado por una línea dibujada desde el sensor hasta la intersección de los ejes puede ser un ángulo mínimo, por ejemplo 10 grados.

La etapa de usar el valor de carga medido comprende usar el valor de carga medido para determinar una componente axial de la carga en la pala de rotor. Por lo tanto, las componentes de borde y de aleta axiales se determinan todas usando el valor de carga del (único) sensor.

Opcionalmente, la turbina eólica comprende al menos tres sensores de carga asociados con la pala de rotor. Dado que cada sensor proporciona la medición de (al menos) las componentes de borde y aleta, ya no hay necesidad de usar cuatro sensores, y en una realización, solo se requieren tres sensores de carga para el cálculo de las componentes. Esto proporciona una reducción de costes y complejidad, retirando el cuarto sensor típico.

En otras realizaciones, puede haber cinco o más sensores para cada pala de rotor. Si bien esto puede no proporcionar un ahorro adicional, cinco o más sensores fuera del eje pueden proporcionar resultados más precisos, u opciones de detección adicionales.

En una realización, el método comprende: medir un valor de carga de cada uno de los al menos tres sensores de carga; y usar los valores de carga medidos de todos de los al menos tres sensores de carga para calcular una carga para la al menos una pala de rotor.

Esta y otras realizaciones descritas más adelante en detalle proporcionan una precisión del sistema y calibración de sensor muy mejoradas, y una optimización del producto, mediante el uso de tres sensores fuera del eje, el uso de los valores de carga de cada uno para proporcionar al menos las componentes de aleta y borde de la carga, y el uso de todos estos datos para calcular la estimación de carga. Por ejemplo, tener las tres fuentes de información permite resolver tres incógnitas en los modelos descritos.

Adecuadamente, los al menos tres sensores de carga están ubicados en posiciones equidistantes alrededor de una periferia de la pala de rotor. Alternativamente, los sensores podrían estar en cualquier punto alrededor de la periferia, sin separación regular particular, aunque estando al menos uno fuera del eje. En realizaciones, los sensores estarán en el mismo plano, por ejemplo, un plano que ocupa una sección a través de la raíz de la pala, ortogonal con respecto al eje de la pala. En realizaciones, el al menos un sensor está ubicado en una raíz de pala de la pala de rotor. La periferia ubicada de la pala puede ser una circunferencia de la raíz de pala. El/los sensor(es) puede(n) estar dispuesto(s) también o alternativamente a lo largo de la longitud de la pala de rotor.

Puede proporcionarse un método de medición de carga en una turbina eólica. La turbina eólica comprende al menos una pala de rotor y al menos tres sensores de carga asociados con la pala de rotor, en la que los al menos tres sensores de carga están ubicados en posiciones en la pala de rotor remotas con respecto tanto a un eje de momento de flexión de aleta como a un eje de momento de flexión de borde. El método puede comprender: medir valores de carga de los sensores de carga; y para cada uno de los al menos tres sensores de carga, usar el valor de carga medido para determinar la fuerza axial, las componentes de momento de flexión de aleta y de momento de flexión de borde de la carga en la pala de rotor.

Este uso de datos de múltiples componentes de los tres sensores para calcular la estimación proporciona una calibración y precisión de sistema mejoradas.

Adecuadamente, el método comprende además estimar al menos una de: la componente de momento de flexión de aleta de la carga; la componente de momento de flexión de borde de la carga; y una componente de fuerza axial de la carga.

Por lo tanto, en realizaciones en las que solo están disponibles uno o dos sensores en la pala de rotor, puede ser necesario o apropiado estimar al menos uno de estos tres factores, ya que valores medidos de los uno o dos sensores pueden no completar satisfactoriamente el cálculo de carga. Por ejemplo, si hay tres incógnitas en el modelo de cálculo

de carga, y dos sensores proporcionan dos entradas de medición, puede usarse una estimación para la tercera incógnita.

5 Una realización de un aspecto de la invención puede proporcionar un programa informático, o un medio legible por ordenador que comprende código de programa informático, adaptado, cuando se carga o ejecuta en un ordenador o procesador, para hacer que el ordenador o procesador lleve a cabo las etapas de un método según cualquiera de los aspectos y realizaciones descritos anteriormente.

10 Una realización de un aspecto adicional de la invención puede proporcionar una turbina eólica que comprende: al menos una pala de rotor; al menos un sensor de carga asociado con las palas de rotor, en la que el al menos un sensor de carga está ubicado en una posición en la pala de rotor remota con respecto tanto a un eje de momento de flexión de aleta como a un eje de momento de flexión de borde de la pala de rotor, en donde son medibles una componente de momento de flexión de aleta y una componente de momento de flexión de borde de la carga en la pala de rotor; y un controlador configurado para realizar un método según las realizaciones descritas anteriormente.

15 Opcionalmente, el al menos un sensor de carga está ubicado en una posición en la pala de rotor en un ángulo radial mínimo desde una intersección del eje de momento de flexión de aleta y el eje de momento de flexión de borde de la pala de rotor. Adecuadamente, la turbina eólica comprende al menos tres sensores de carga asociados con la pala de rotor. Opcionalmente, los al menos tres sensores de carga están ubicados en posiciones equidistantes alrededor de una periferia de la pala de rotor.

20 Una realización de un aspecto adicional de la invención puede proporcionar un método de medición de carga en una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica al menos una pala de rotor y al menos un sensor de carga asociado con la pala de rotor, en el que el al menos un sensor de carga está ubicado en una posición en la pala que no está en un eje de momento de flexión de aleta o un eje de momento de flexión de borde, comprendiendo el método: medir un valor de carga del sensor de carga; y usar el valor de carga medido para determinar: una componente de momento de flexión de aleta de la carga en la pala de rotor; y una componente de momento de flexión de borde de la carga.

25 Una realización de un aspecto adicional de la invención puede proporcionar un método de medición de carga en una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica al menos una pala de rotor y al menos un sensor de carga asociado con la pala de rotor, en el que el al menos un sensor de carga está ubicado en una posición en la pala de rotor remota con respecto tanto a un eje de momento de flexión de aleta como a un eje de momento de flexión de borde de la pala de rotor, comprendiendo el método: medir un valor de carga del sensor de carga; y usar el valor de carga medido para determinar al menos dos de: una componente de momento de flexión de aleta de la carga; una componente de momento de flexión de borde de la carga; y una componente de fuerza axial de la carga.

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

40 **Breve descripción de los dibujos**

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

45 la figura 1 es una vista esquemática de una turbina eólica según una realización de la presente invención;

la figura 2 es una vista esquemática de una pala de rotor de la turbina eólica mostrada en la figura 1;

50 la figura 3 es un diagrama que ilustra una sección transversal de una pala de rotor de turbina según un sistema considerado previamente; y

la figura 4 es un diagrama que ilustra una sección transversal de una pala de rotor de turbina según una realización de la invención.

55 **Descripción detallada de las realizaciones**

Realizaciones de esta invención incluyen el uso de uno o más sensores de carga de pala montados en cualquier lugar a lo largo de la pala, sin estar restringidos a alinearse con los ejes principales de la pala. Las realizaciones de esta invención se centran en la aplicación de tres sensores situados 'fuera del eje'.

60 Las realizaciones descritas proporcionan soluciones que permiten que los sensores (uno o más) se sitúen en cualquier lugar por todo el interior de la pala. Tres soluciones de sensor pueden proporcionar momentos de flexión tanto de aleta como de borde y fuerza axial.

65 Estas realizaciones resuelven el problema de montar sensores fuera de los ejes principales, así como retirar un sensor redundante (solo se necesitan tres sensores en lugar de cuatro). El modelo matemático asociado con estas realizaciones también mejora la calibración y el funcionamiento de los sistemas existentes que usan uno y cuatro

sensores. Además, con algunos diseños de pala, la ubicación óptima del sensor puede en cualquier caso no estar a lo largo de los ejes principales - realizaciones de la invención lo permiten/proporcionan.

Los inventores han reconocido que hay tres factores significativos que influyen en la medición de deformación; el momento de flexión de aleta, el momento de flexión de borde y la componente de fuerza axial de la carga en la pala de rotor. En disposiciones previamente consideradas, si un sensor se colocó con precisión en el eje de aleta, el cálculo de carga podría suponer que la componente de borde (y viceversa) puede ignorarse. Para la componente axial restante, se han usado pares de sensores para intentar anular este factor.

Realizaciones de la invención, en cambio, usan un modelo (genérico) de la carga que usa las tres componentes (en lugar de suponer que uno es cero, o anular uno). Por lo tanto, ya no existe preocupación por la posición de los sensores en un eje, con el fin de realizar tal anulación de puesta a cero o de par. En realizaciones, la invención usa un modelo de cálculo de carga que usa las tres componentes, que tiene tres incógnitas, que en una realización puede resolverse usando valores de (al menos) tres sensores, en cualquier posición separada alrededor de la pala. En alternativas, puede usarse una estimación para uno o dos de los tres factores, de modo que solo se usen uno o dos sensores.

La figura 1 es una vista esquemática de una turbina eólica según una realización de la presente invención. Una turbina eólica 10 comprende una torre 12 en 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 igualmente separadas 20a, 20b, 20c. El rotor 16 incluye un sistema de paso de pala capaz de variar el ángulo de paso de cada pala de rotor 20a, 20b, 20c de manera independiente, por ejemplo, usando un accionamiento de paso de pala eléctrico o hidráulico.

Las palas de rotor 20a, 20b, 20c comprenden una cubierta exterior que define un interior sustancialmente hueco. Cada una de las palas tiene una región de punta sustancialmente sólida, que comprende los 1-2 metros más externos de la pala. La cubierta exterior está construida principalmente de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio. Las palas de rotor 20a, 20b, 20c tienen cada una una sección transversal sustancialmente cilíndrica en su extremo de raíz 22. La sección transversal pasa suavemente a un perfil aerodinámico en una posición de cuerda máxima como se indica por la línea A-A. La cuerda disminuye entonces progresivamente hacia la punta 24 de las palas de rotor 20a, 20b, 20c. Las palas de rotor 20a, 20b, 20c también se reducen en sección constantemente en grosor a lo largo de su longitud avanzando desde la raíz 22 hacia la punta 24.

Un sistema de detección de carga 26 está ubicado cerca de un extremo de raíz 22 de la pala de rotor 20a.

La figura 2 es una vista esquemática de una pala de rotor de la turbina eólica mostrada en la figura 1, que muestra la pala de rotor 20a con más detalle. El sistema de detección de carga 26 comprende uno o más sensores de carga 30. Los sensores de carga 30 están separados circunferencialmente alrededor del extremo de raíz 24 de la pala de rotor 20a, y están montados en la superficie interna de la cubierta de pala de rotor para protegerlos del entorno. En otras realizaciones, los sensores de carga 30 pueden montarse en la superficie exterior de la cubierta o incorporarse dentro de la cubierta.

En realizaciones alternativas, el/los sensor(es) de carga puede(n) 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. La posición se elige normalmente para medir la deformación mecánica en esa parte de la pala. Por supuesto, pueden montarse sensores en ambas, o más, posiciones.

Los sensores de carga 30 están configurados para medir la deformación mecánica del extremo de raíz de pala. En esta realización, los sensores de carga 30 son medidores de deformación ópticos tales como rejillas Bragg de fibra que comprenden puntos de reflexión separados de manera igualitaria en el núcleo de la fibra óptica que reflejan diferentes longitudes de onda de luz bajo diferentes niveles de deformación. También pueden usarse otros tipos convencionales de sensores de carga y medidores de deformación.

Como las turbinas eólicas son estructuras muy altas, son susceptibles a los impactos de rayos que pueden provocar daños a la turbina eólica 10. El uso de sensores de carga óptica elimina componentes metálicos o eléctricamente conductores en partes expuestas del rotor, reduciendo de ese modo la vulnerabilidad de la pala de rotor 20a a los impactos de rayos.

Un conjunto optoelectrónico 32 está ubicado remoto con respecto a la pala de rotor 20a, por ejemplo, en la góndola 14 o el buje 18 de la turbina eólica 10. El conjunto optoelectrónico 32 y el sistema de ajuste de paso de pala de la turbina eólica están conectados a un controlador 33.

Los sensores de carga 30 están conectados en serie con el conjunto optoelectrónico 32 por fibras ópticas 38 como es convencional en la técnica. El conjunto optoelectrónico 32 comprende además una fuente de luz conectada al sensor de carga, o el primer sensor de carga en la serie, y un detector de luz conectado al sensor de carga, o el último sensor de carga en la serie.

El controlador 33 incluye una memoria en la que se almacena software de control, y un procesador para ejecutar el software de control. El software de control dirige el funcionamiento de los sensores de carga 30 y el sistema de ajuste

de paso de pala. Como se describirá con más detalle más adelante, el software de control controla, por ejemplo, la medición de un valor de carga del sensor de carga; y el uso del valor de carga medido para determinar: una componente de momento de flexión de aleta de la carga; y una componente de momento de flexión de borde de la carga; y una componente de fuerza axial de la carga.

Se ha desarrollado un modelo matemático y un método de calibración que permiten el uso y la calibración de sistemas de tanto único sensor como múltiples sensores con el mismo software de turbina. El modelo es más genérico que en los métodos previamente considerados e incluye más grados de libertad. Trata los sensores independientemente, lo que permite una solución con uno, dos, tres, cuatro (o más) sensores, aunque tres es todo lo que es necesario para la realización particular descrita con referencia a la figura 4. Al tratar los sensores de forma independiente, pueden colocarse en cualquier lugar a lo largo de la circunferencia de la pala como se muestra en la figura 4.

La figura 4 es un diagrama que ilustra una sección transversal de una pala de rotor de turbina según una realización de la invención. Muchos componentes son similares a los ilustrados en la figura 3. El conjunto de pala de rotor 400 tiene de nuevo una sección de pala de rotor externa, cuya sección transversal se indica mediante las líneas discontinuas 404. Esta sección transversal en la figura 4 se toma en la raíz de pala, que tiene una circunferencia 402. Los sensores 406 se montan nuevamente en la circunferencia de la raíz de pala. Sin embargo, en este caso solo hay tres sensores de carga, en lugar de cuatro. Además, en este caso, todos los sensores están montados en posiciones que no se alinean con el eje de momento de flexión de borde 408, el eje a través de los bordes delantero y trasero de la pala o el eje de aleta 410, ortogonal con respecto al eje de borde. Cada uno de los sensores están al menos a una distancia mínima o un ángulo radial alejados de una posición en alineación con un eje u otro. En la práctica, esto significa que evitan obstáculos que pueden estar presentes en aquellas áreas que afectarían al posicionamiento y la instalación. Funcionalmente, esto significa que los sensores pueden medir al menos un mínimo de la otra componente de momento de flexión, de modo que cada sensor puede usarse (al menos) para datos de carga de momento tanto de aleta como de borde. Por ejemplo, el sensor 1 en la figura 4 (406) está montado cerca, pero no en alineación con, el eje de aleta (410). Esto significa que la mayor parte de la ganancia para este sensor estará en la dirección de aleta pero, sin embargo, también habrá una componente en la dirección de borde.

Por lo tanto, los sensores ya no son específicamente sensores de "aleta" o de "borde" o se tratan como un par diferencial. Cada sensor simplemente se considera un sensor de deformación que mide la deformación total que proviene de las fuerzas axiales y los momentos de flexión, como se describe a continuación.

Los sensores en la figura 4 son equidistantes alrededor de la circunferencia de la raíz de pala. Sin embargo, este no tiene por qué ser el caso; en otras realizaciones, los sensores se colocan fuera del eje, pero de manera irregular (no obstante, pueden usarse métodos similares para combinar sus salidas y encontrar las componentes de carga). De manera similar, es posible que no se requiera que todos los sensores estén fuera del eje, si al menos dos están fuera del eje, un tercero puede estar alineado, aunque esto puede requerir que se haga una estimación de una tercera componente de carga (véase a continuación: menos sensores). En realizaciones, puede ser necesario que los sensores no se coloquen demasiado cerca uno del otro, es decir, que se extiendan alrededor de la circunferencia de la pala para garantizar una buena solución matemática. Si se colocan dos sensores uno al lado del otro, pueden convertirse de manera efectiva en uno para los fines del modelo de cálculo de carga y, por lo tanto, la solución puede ser altamente sensible y menos precisa.

Debe indicarse que también puede haber una componente de torsión o "de giro", pero para sensores montados a lo largo de la dirección de pala, la componente de torsión debe ser insignificante.

El modelo de sensor de deformación se basa en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Deformación} = K_{\text{sensor}} \text{Sensor} + O_{\text{sensor}}$$

$$\text{Deformación} = K_{\text{Axial}} F_{\text{Axial}} + K_{\text{Aleta}} M_{\text{Aleta}} + K_{\text{Borde}} M_{\text{Borde}}$$

donde: K_{Sensor} es un factor de conversión de valor de sensor de carga con respecto a deformación (conocida); O_{Sensor} es el desplazamiento del sensor; F_{Axial} es la fuerza axial provocada por la gravedad y la rotación de pala (fuerza centrífuga/centrípetas); M_{Aleta} es el momento de flexión de aleta; M_{Borde} es el momento de flexión de borde; K_{Axial} es la "ganancia" de rigidez de pala en la dirección axial; K_{Aleta} es la ganancia de rigidez de pala en la dirección de aleta; y K_{Borde} es la ganancia de rigidez de pala en la dirección de borde.

Los sensores se calibran por separado y luego se combinan para calcular las cargas. El número de sensores instalados normalmente dicta qué tipos de cargas pueden calcularse. Los sensores se calibran usando un estimador de cargas de pala que proporciona la fuerza axial estimada y los momentos de flexión de aleta/borde. Usando la teoría de la estimación, las variables de estado desconocidas se resuelven encontrando una solución de error mínimo.

Durante la calibración:

$$K_{Sensor} Sensor = K_{Axial} F_{Axial, Estimada} + K_{Aleta} M_{Aleta, Estimada} + K_{Borde} M_{Borde, Estimado} - O_{Sensor}$$

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

Pueden usarse técnicas de calibración estándar para calibrar los sensores.

5 En sistemas que tienen sensores en los ejes principales, los sensores de “aleta” deben tener una baja ganancia de borde y los sensores de “borde” deben tener una baja ganancia de aleta. En teoría, un sensor de aleta tendría una ganancia de borde nula, pero debido a la desalineación del sensor, normalmente hay algo de “acoplamiento cruzado” en tales sistemas, lo que conduce a una imprecisión si se ignora el “acoplamiento cruzado”.

10 El uso de un modelo de sensor genérico que incluye tanto ganancias de aleta como de borde permite que los sensores se coloquen fuera del eje, y la calibración encontrará las ganancias apropiadas según su ubicación. Las cargas pueden calcularse combinando o “fusionando” los datos de carga de los tres (o más) sensores. En primer lugar, las deformaciones se calculan mediante la ecuación definida anteriormente. A continuación, para el cálculo de cargas con tres o más sensores, estas se dan mediante:

15

$$\begin{bmatrix} F_{Axial} \\ M_{Aleta} \\ M_{Borde} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Axial,1} & K_{Aleta,1} & K_{Borde,1} \\ K_{Axial,2} & K_{Aleta,2} & K_{Borde,2} \\ K_{Axial,3} & K_{Aleta,3} & K_{Borde,3} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Deformación_1 \\ Deformación_2 \\ Deformación_3 \\ \dots \end{bmatrix}$$

20 Por lo tanto, el método de realizaciones de la invención también difiere de algunos métodos en que el cálculo es en dos etapas. En primer lugar, los datos del sensor de carga sin procesar se usan para encontrar los valores de deformación, usando la calibración. En segundo lugar, los valores de deformación se usan para calcular las fuerzas axiales y las componentes de momento de flexión, como en la ecuación anterior.

25 Como puede verse a partir de las ecuaciones anteriores, si hay sistemas en los que se prefieren menos de tres sensores, o solo son posibles menos de tres, el mismo sistema y métodos pueden usarse para encontrar determinadas componentes y no otras, que entonces tendrían que estimarse de otro modo. Por ejemplo, en un sistema con dos sensores, los valores de deformación podrían usarse para encontrar los momentos de aleta y borde, y podría hacerse una estimación de las componentes axiales por otros medios, o las componentes axiales podrían ignorarse, o valorarse según una tasa fija o método tabulado.

30 Los expertos en la técnica apreciarán que la invención se ha descrito solo a modo de ejemplo y que puede adoptarse una variedad de enfoques alternativos sin apartarse del alcance de la invención, como se define por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método de medición de carga en una turbina eólica (10), comprendiendo la turbina eólica (10) al menos una pala de rotor (20a, 20b, 20c) y al menos un sensor de carga (30) asociado con la pala de rotor (20a, 20b, 20c),
 en el que el al menos un sensor de carga (30) está ubicado en una posición en la pala de rotor (20a, 20b, 20c) remota con respecto tanto a un eje de momento de flexión de aleta (410) como a un eje de momento de flexión de borde (408) de la pala de rotor (20a, 20b, 20c), en donde una componente de momento de flexión de aleta y una componente de momento de flexión de borde de la carga en la pala de rotor (20a, 20b, 20c) son medibles,
 comprendiendo el método:
 medir un valor de carga del sensor de carga (30); y
 usar el valor de carga medido para determinar:
 una componente de momento de flexión de aleta de la carga;
 una componente de momento de flexión de borde de la carga, y
 una componente axial de la carga en la pala de rotor (20a, 20b, 20c),
 estando el método caracterizado porque comprende además
 calibrar por separado cada uno del al menos uno de los sensores de carga (30) usando un estimador de cargas de pala que proporciona fuerza axial estimada y momentos de flexión de aleta/borde con el fin de obtener una ganancia de rigidez de pala (K_{Axial} , K_{Aleta} , K_{Borde}),
 usar el valor de carga medido y la ganancia de rigidez de pala obtenida (K_{Axial} , K_{Aleta} , K_{Borde}) para determinar las componentes de carga.
2. Un método según la reivindicación 1, en el que el al menos un sensor de carga (30) está ubicado en una posición en la pala de rotor a una distancia mínima lejos de una posición en alineación con el eje de momento de flexión de aleta (410) o el eje de momento de flexión de borde (408) de la pala de rotor (20a, 20b, 20c).
3. Un método según cualquier reivindicación anterior, comprendiendo la turbina eólica (10) al menos tres sensores de carga asociados con la pala de rotor (20a, 20b, 20c).
4. Un método según la reivindicación 3, comprendiendo el método:
 medir un valor de carga de cada uno de los al menos tres sensores de carga (30); y
 usar los valores de carga medidos de todos los al menos tres sensores de carga (30) para calcular una carga para la al menos una pala de rotor (20a, 20b, 20c).
5. Un método según la reivindicación 3 o la reivindicación 4, en el que los al menos tres sensores de carga (30) están ubicados en posiciones equidistantes alrededor una periferia de la pala de rotor (20a, 20b, 20c).
6. Un método según cualquier reivindicación anterior, en el que el al menos un sensor (30) está ubicado en una raíz de pala de la pala de rotor (20a, 20b, 20c).
7. Un método según cualquier reivindicación anterior, que comprende además estimar al menos una de: la componente de momento de flexión de aleta de la carga; la componente de momento de flexión de borde de la carga; y una componente de fuerza axial de la carga.
8. Un programa informático, o un medio legible por ordenador que comprende código de programa informático, adaptado, cuando se carga o ejecuta en un ordenador o procesador, para hacer que el ordenador o procesador lleve a cabo etapas de un método según cualquier reivindicación anterior.
9. Una turbina eólica (10) que comprende:
 al menos una pala de rotor (20a, 20b, 20c);
 al menos un sensor de carga (30) asociado con las palas de rotor (20a, 20b, 20c),

5 en la que el al menos un sensor de carga (30) está ubicado en una posición en la pala de rotor (20a, 20b, 20c) remota con respecto tanto a un eje de momento de flexión de aleta (410) como a un eje de momento de flexión de borde (408) de la pala de rotor (20a, 20b, 20c), en donde una componente de momento de flexión de aleta y una componente de momento de flexión de borde de la carga en la pala de rotor (20a, 20b, 20c) son medibles; y

un controlador (33) configurado para realizar un método según cualquier reivindicación anterior.

10 10. Una turbina eólica (10) según la reivindicación 9, en la que el al menos un sensor de carga (30) está ubicado en una posición en la pala de rotor (20a, 20b, 20c) en una distancia mínima alejada de una posición en alineación con el eje de momento de flexión de aleta (410) o el eje de momento de flexión de borde (408) de la pala de rotor (20a, 20b, 20c).

15 11. Una turbina eólica (10) según la reivindicación 9 o la reivindicación 10, comprendiendo la turbina eólica (10) al menos tres sensores de carga (30) asociados con la pala de rotor (20a, 20b, 20c).

20 12. Una turbina eólica (10) según la reivindicación 11, en la que los al menos tres sensores de carga están ubicados en posiciones equidistantes alrededor de una periferia de la pala de rotor (20a, 20b, 20c).

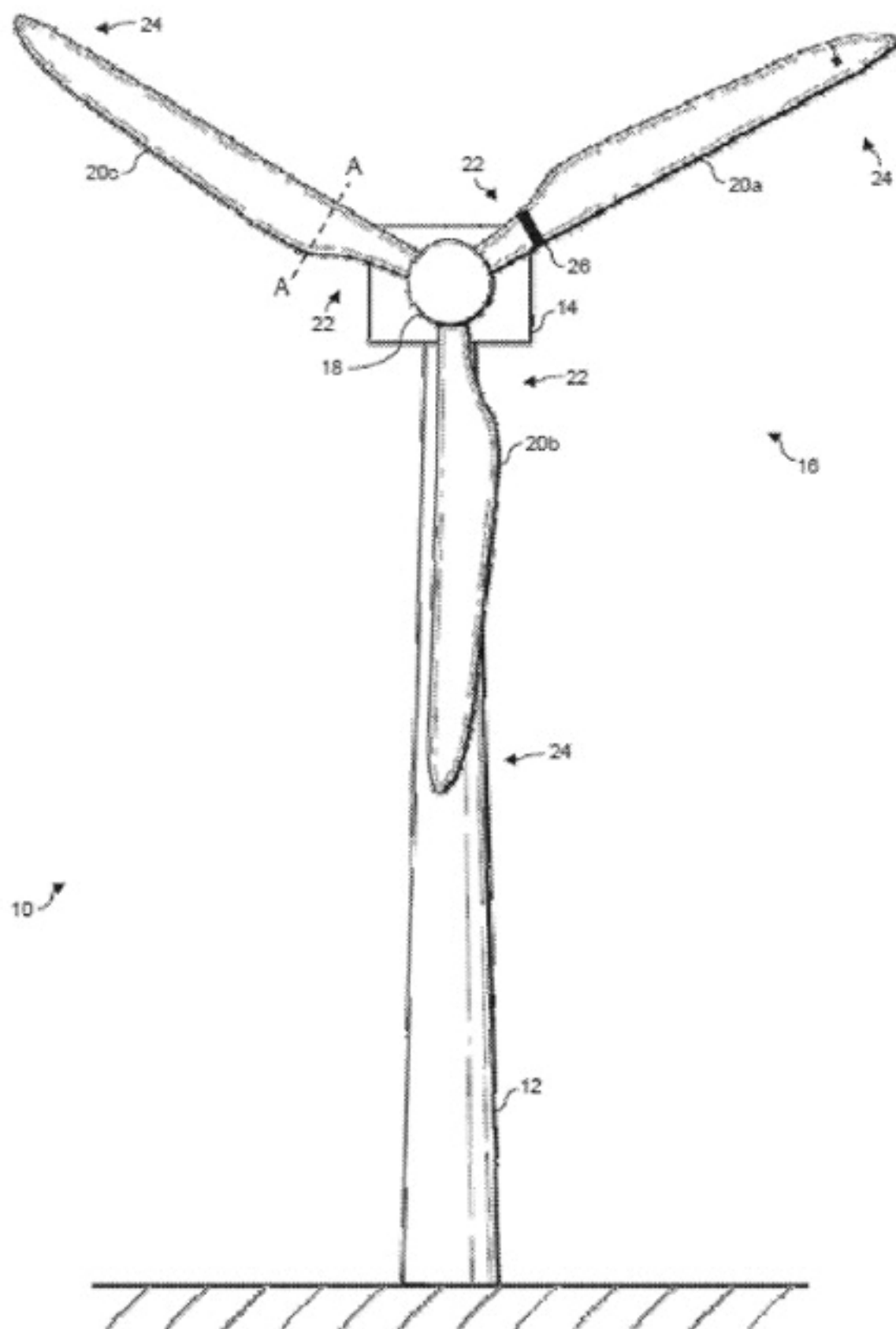


Figura 1

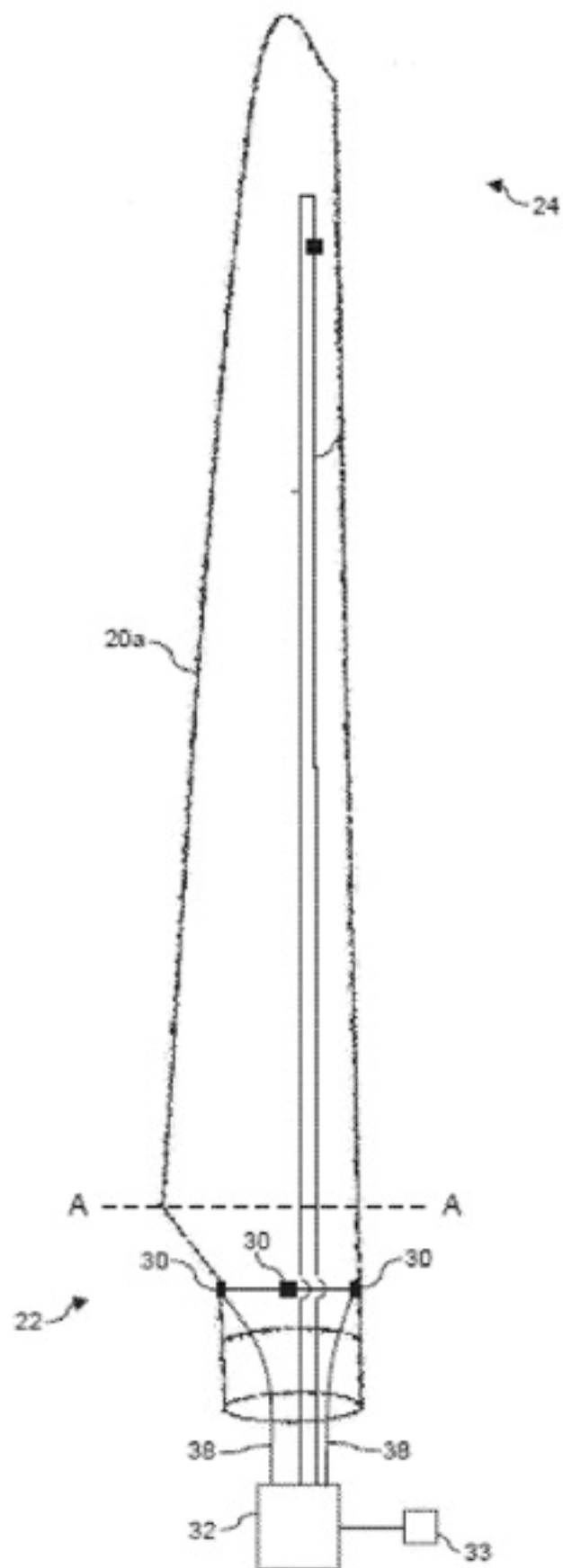


Figura 2

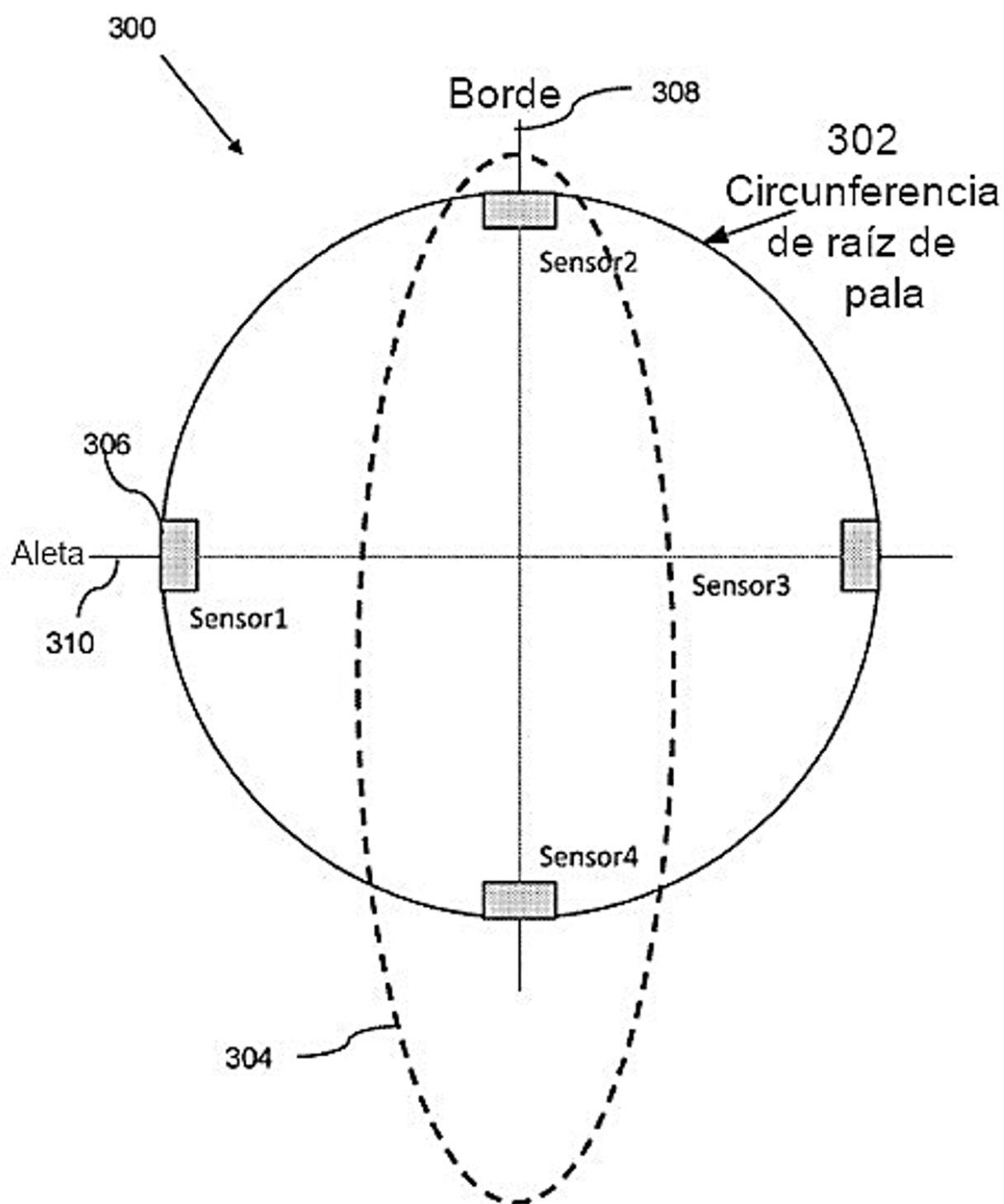


Figura 3

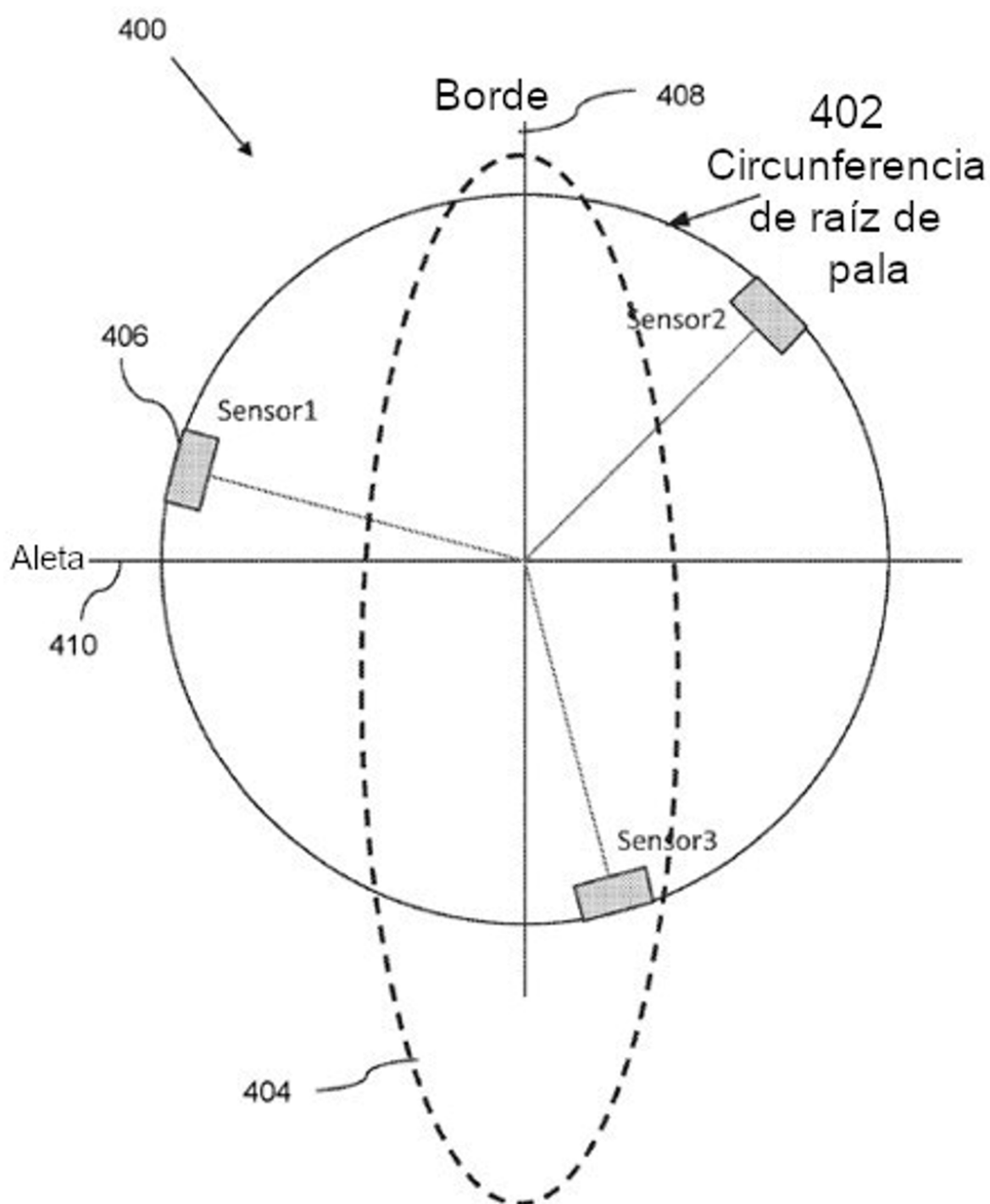


Figura 4