

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 587 230**

51 Int. Cl.:

**F03D 17/00** (2006.01)

**F03D 80/40** (2006.01)

**G01M 5/00** (2006.01)

**G01L 1/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.07.2011 PCT/DK2011/050275**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.01.2012 WO12007005**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.07.2011 E 11733561 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.06.2016 EP 2593671**

54 Título: **Método y sistema para monitorizar deformaciones por flexión en palas de turbina eólica**

30 Prioridad:

**14.12.2010 GB 201021226**  
**14.07.2010 US 364079 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**21.10.2016**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**OLESEN, IB SVEND**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 587 230 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 y sistema para monitorizar deformaciones por flexión en palas de turbina eólica

### Campo de la invención

La presente invención se refiere a la detección de hielo u otra materia extraña en palas de turbina eólica.

### 5 Antecedentes de la invención

La figura 1 ilustra una turbina eólica 1. La turbina eólica comprende una torre 2 de turbina eólica sobre la que se monta una góndola 3 de turbina eólica. Un rotor 4 de turbina eólica que comprende al menos una pala 5 de turbina eólica se monta sobre un buje 6. El buje 6 se conecta a la góndola 3 a través de un árbol de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde la parte delantera de la góndola. La turbina eólica ilustrada en la figura 1 puede ser un modelo pequeño destinado al uso doméstico o servicios públicos ligeros, o puede ser un modelo grande, tal como aquellos que se usan en la generación de electricidad a gran escala o en un parque eólico por ejemplo. En el último caso, el diámetro del rotor puede ser de hasta 100 metros o más.

La formación de hielo en palas de turbina eólica es un problema bien conocido, dado que las turbinas eólicas se instalan frecuentemente en ambientes fríos o tormentosos. La acumulación de hielo u otra materia, tal como polvo, es un riesgo y conduce a un reducido rendimiento de la turbina eólica. Es un riesgo porque el hielo u otra materia en las palas de turbina puede caerse de las palas en cualquier momento, y en grandes cantidades. Reduce el rendimiento de la turbina eólica porque afecta al comportamiento aerodinámico de las palas y porque puede ser necesario detener la turbina para eliminar hielo o polvo peligroso.

La detección de hielo en palas de turbina eólica se ha conseguido de diversas maneras. Un método que se ha propuesto es monitorizar las cargas de flexión en palas de turbina eólica.

Se conoce dotar a las palas de una turbina eólica de medidores de deformación para monitorizar el momento de flexión en las palas. Esto puede usarse para monitorizar las cargas aplicadas a las palas, véase por ejemplo el documento de patente US 2009/0263246 A1. Se conocen sensores ópticos de deformación, tales como sensores de deformación del tipo de redes de Bragg en fibra ("Fibre Bragg Grating"), para monitorizar la deformación en palas de turbina eólica. Los sensores ópticos de deformación para medir la deformación en palas de turbina eólica, y en particular para medir la deformación por flexión longitudinal, se colocan normalmente en la raíz de la pala de turbina. La medición de deformación por flexión longitudinal de una pala de turbina eólica requiere una técnica de medición que pueda distinguir entre la deformación en un sensor de deformación como resultado de fuerzas de flexión y deformación resultante de otras fuerzas, tales como la fuerza centrípeta. Para hacer esto, los sensores de deformación se disponen en pares alrededor de la raíz de la pala de turbina, con los sensores en cada par dispuestos diametralmente opuestos entre sí. La deformación debida a la flexión detectada por los sensores en cada par debería ser aproximadamente igual pero de signo opuesto, ya que un sensor estará bajo tensión y uno bajo compresión. La deformación debida a la fuerza centrípeta debería ser el mismo para ambos sensores. El uso de dos pares de sensores permite determinar una deformación por flexión en dos dimensiones, es decir periférica y longitudinal. A partir de cambios en estas deformaciones por flexión, puede detectarse la acumulación de hielo.

Aunque este método de medir la deformación por flexión da buenos resultados en teoría, en la práctica no es tan preciso como se requiere en algunas aplicaciones. Esto se debe a varios factores. En primer lugar, el material usado para formar las palas de turbina no es totalmente homogéneo. En segundo lugar, el grosor de el material que forma las palas de turbina no es totalmente uniforme. En tercer lugar, la temperatura de la pala de turbina eólica puede variar ligeramente de un punto a otro. En cuarto lugar, los sensores pueden no estar montados de manera totalmente precisa. En quinto lugar, en la práctica, los sensores a menudo fallan o dan resultados erróneos durante su vida útil.

Hemos determinado que hay una necesidad de un modo más sensible de detectar la acumulación de hielo u otra materia en palas de turbina eólica.

### 45 Sumario de la invención

En un primer aspecto de la invención, se proporciona un método de monitorización de la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:

ubicar al menos tres sensores de deformación en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación;

calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;

calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes; y

calcular un valor de confianza para un primer sensor basándose en una comparación de deformaciones por flexión resultantes derivadas de la medida de deformación del primer sensor con la deformación por flexión resultante promedio.

5 Las medidas de deformación individuales pueden convertirse en momentos de flexión antes de calcular los momentos de flexión resultantes y el momento de flexión resultante promedio. Esto es útil si la relación entre la deformación por flexión y el momento de flexión no es la misma para todos los sensores. Este puede ser el caso si la sección transversal de la pala en la posición de los sensores no es simétrica y homogénea. Por consiguiente, los términos “deformación por flexión resultante” y “deformación por flexión resultante promedio”, tal como se usan en el presente documento, deberían interpretarse para incluir “momento de flexión resultante” y “momento de flexión resultante promedio”, respectivamente.

10 Cada deformación por flexión resultante se calcula preferiblemente a partir de las medidas de deformación por flexión tomadas desde un par diferente de sensores de deformación, donde los sensores de deformación en cada par proporcionan medidas de deformación por flexión en direcciones no paralelas entre sí. Dependiendo del tipo y de la orientación de los sensores de deformación, cada medida de deformación por flexión puede ser una salida de medida de deformación simple de un sensor de deformación o puede ser una medida de deformación de un sensor de deformación procesada para eliminar componentes de no flexión de la medida de deformación.

15 El valor de confianza puede calcularse de diversas maneras. Por ejemplo, el valor de confianza puede basarse en una diferencia absoluta entre las deformaciones por flexión resultantes derivadas de la medida del primer sensor con la deformación por flexión resultante promedio. Alternativamente, el valor de confianza puede basarse en un número de desviaciones estándar relativo a la medida de deformación por flexión del primer sensor con respecto a la deformación por flexión resultante promedio.

20 Preferiblemente, el método comprende además ubicar al menos cuatro sensores de deformación en la pala de turbina; y comprende además la etapa de comparar el valor de confianza con un umbral de confianza, y si el valor de confianza es menor que el umbral de confianza, recalcular una deformación por flexión resultante promedio sin usar la medida de deformación del primer sensor de deformación.

25 Preferiblemente, el método comprende además la etapa de calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio. Preferiblemente, el valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio se basa en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí, o con la deformación por flexión resultante promedio. El valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio puede, por ejemplo, basarse en el valor de una desviación estándar de una distribución normal que se ajusta a la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes.

30 Preferiblemente, los sensores de deformación se ubican para proporcionar medidas de deformación por flexión en al menos tres direcciones no paralelas. Preferiblemente, todos los sensores están colocados sustancialmente equidistantes del extremo de la raíz de la pala.

35 Preferiblemente, cada uno de los sensores de deformación es un sensor óptico de deformación, tal como un sensor del tipo de redes de Bragg en fibra.

40 Preferiblemente, el método comprende además ubicar al menos cinco sensores de deformación en la pala de turbina. Preferiblemente, los sensores de deformación se ubican simétricamente alrededor del eje longitudinal de la pala. Esto permite un cálculo simple de deformación por flexión para cada sensor de deformación y la capacidad de recalcular la deformación por flexión promedio basándose en medidas de solo tres o cuatro de los sensores de deformación si uno o dos sensores de deformación dan medidas erróneas. Para proporcionar una mayor redundancia y una confianza y precisión de resolución mayor, puede usarse un mayor número de sensores de deformación.

45 Preferiblemente, el método comprende además calcular componentes de no flexión de las medidas de deformación de los sensores de deformación. Preferiblemente, el método comprende además calcular el par torsor alrededor del eje longitudinal de la pala a partir de las medidas de deformación de los sensores de deformación. El par torsor puede calcularse como un promedio a partir de una pluralidad de medidas. El término “par torsor” pretende significar las fuerzas de torsión en la pala a diferencia de cualquier fuerza de flexión en la pala.

50 En un segundo aspecto de la invención, se proporciona un método de monitorización de la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:

ubicar al menos tres sensores de deformación en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación;

calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;

55 calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión

resultantes; y

5 calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio basándose en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí o con la deformación por flexión resultante promedio. El valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio puede, por ejemplo, basarse en el valor de una desviación estándar de una distribución normal que se ajusta a la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes.

10 Cada deformación por flexión resultante se calcula preferiblemente a partir de las medidas de deformación por flexión tomadas desde un par diferente de sensores de deformación, donde los sensores de deformación en cada par proporcionan las medidas de deformación por flexión en direcciones no paralelas entre sí. Dependiendo del tipo y de la orientación de los sensores de deformación, cada medida de deformación por flexión puede ser una salida de medida de deformación simple de un sensor de deformación o puede ser una medida de deformación de un sensor de deformación procesada para eliminar componentes de no flexión de la medida de deformación. Preferiblemente, todos los sensores están colocados sustancialmente equidistantes del extremo de la raíz de la pala.

15 En un tercer aspecto, la invención es un sistema para monitorizar la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:

al menos tres sensores de deformación ubicados en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación; y

20 un procesador de señales conectado a cada uno de los sensores de deformación, estando el procesador de señales configurado para:

calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;

calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes; y

25 calcular un valor de confianza para un primer sensor basándose en una comparación de deformaciones por flexión resultantes derivadas de la medida de deformación del primer sensor con la deformación por flexión resultante promedio.

Preferiblemente, los sensores de deformación se ubican para proporcionar medidas de deformación por flexión en al menos tres direcciones no paralelas.

30 Preferiblemente, cada uno de los sensores de deformación es un sensor óptico de deformación, tal como un sensor del tipo de redes de Bragg en fibra.

Preferiblemente, el sistema comprende al menos cuatro sensores de deformación en la pala de turbina, y el procesador de señales está configurado además para comparar el valor de confianza con un umbral de confianza, y si el valor de confianza es menor que el umbral de confianza, recalculan una deformación por flexión resultante promedio sin usar la medida de deformación del primer sensor de deformación.

35 Preferiblemente, el procesador de señales está configurado además para calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio. Preferiblemente, el procesador de señales está configurado para calcular el valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio basándose en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí, o con la deformación por flexión resultante promedio. El valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio puede, por ejemplo, basarse en el valor de una desviación estándar de una distribución normal que se ajusta a la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes.

40 Preferiblemente, el sistema comprende al menos cinco sensores de deformación en la pala de turbina. Preferiblemente, los sensores de deformación se ubican simétricamente alrededor del eje longitudinal de la pala.

45 En un cuarto aspecto, la invención es un sistema para monitorizar la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:

al menos tres sensores de deformación ubicados en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación; y

50 un procesador de señales conectado a cada uno de los sensores de deformación, estando el procesador de señales configurado para:

calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;

calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes; y

5 calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio basándose en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí o con la deformación por flexión resultante promedio. El valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio puede, por ejemplo, basarse en el valor de una desviación estándar de una distribución normal que se ajusta a la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes.

10 Preferiblemente, los sensores de deformación están configurados para permitir que tanto el par torsor alrededor del eje longitudinal de la pala como los momentos de flexión se deriven a partir de sus salidas. Preferiblemente, la pluralidad de sensores de deformación comprende al menos un par de sensores de deformación adyacentes colocados en la pala de manera que sus ejes sensibles no sean paralelos con el eje longitudinal de la pala. Preferiblemente, los ejes sensibles de cada par de sensores se disponen simétricamente alrededor de una línea paralela con el eje longitudinal de la pala pero no son perpendiculares a ella. Las medidas de deformación de cada par de sensores pueden entonces combinarse simplemente para determinar la deformación por flexión y la deformación por el momento de torsión. Por ejemplo, cada par de sensores puede disponerse en forma de "V" o una forma de "X".

15 Debería estar claro que cuando se hace referencia a un valor de confianza o un umbral de error, tal valor puede igualmente expresarse como un valor de error o un umbral de error. Los valores de confianza pueden compararse con un umbral de confianza para determinar si el valor de confianza es menor que el umbral de confianza. Para proporcionar la misma información, un valor de error correspondiente puede compararse con un umbral de error para determinar si el valor de error es mayor que el umbral de error. Por consiguiente, debería entenderse que el término "valor de confianza" abarca "valor de error" y debería entenderse que el término "umbral de confianza" abarca "umbral de error".

20 En un quinto aspecto, la invención es un sistema para monitorizar una pala de turbina eólica que comprende un par de sensores de deformación ubicados en la pala de turbina eólica colocados en la pala de manera que sus ejes sensibles no sean paralelos con un eje longitudinal de la pala, estando dispuestos los ejes sensibles simétricamente alrededor de una línea paralela con un eje longitudinal de la pala pero no perpendiculares a ella.

**Breve descripción de los dibujos**

30 Se describirán a continuación en detalle unas realizaciones de la presente invención, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una ilustración esquemática de una turbina eólica;

la figura 2 es una ilustración esquemática de un sistema de monitorización según la presente invención;

la figura 3 es una sección transversal esquemática que muestra la posición de los sensores de deformación de la figura 2;

35 la figura 4a es una ilustración esquemática de una primera configuración de pares de sensores de deformación para determinar la deformación por flexión y torsión;

la figura 4b es una ilustración esquemática de una segunda configuración de pares de sensores de deformación para determinar la deformación por flexión y torsión;

40 la figura 4c es una ilustración esquemática de una tercera configuración de pares de sensores de deformación para determinar la deformación por flexión y torsión;

la figura 5a es una ilustración gráfica del cálculo de la deformación por flexión usando los sensores de las figuras 2 y 3, según un primer ejemplo;

la figura 5b es una vista detallada de los puntos de cruce de las líneas P1 a P5 en la figura 4a;

45 la figura 6a es una ilustración gráfica del cálculo de la deformación por flexión usando los sensores mostrados en las figuras 2 y 3, en un segundo ejemplo; y

la figura 6b es una vista detallada de los puntos de cruce de las líneas P1 a P5 en la figura 5a.

**Descripción detallada**

50 La figura 2 muestra una pala de turbina eólica 5 con cinco pares de sensores de deformación 20 colocados alrededor de un extremo de la raíz de la pala de turbina, según una realización de la presente invención. Los pares de sensores de deformación 20 son sensores del tipo de redes de Bragg en fibra (FBG) dentro de fibras ópticas, dispuestos en una configuración en "V". Cada una de las fibras ópticas 22 en las que se forman los FBG se conecta

a un procesador de señales 24. El procesador de señales 24 tiene una salida 26 para proporcionar medidas de deformación para el uso en el diagnóstico y/o control de la turbina eólica.

5 La figura 3 es una sección transversal esquemática de la raíz de la pala mostrada en la figura 2. Puede verse a partir de la figura 3 que los FBG 20 se disponen simétricamente alrededor del eje longitudinal de la pala 5. Los sensores también se colocan equidistantes del extremo de la raíz de la pala en la dirección longitudinal.

10 Pueden usarse alternativamente otras formas de sensores ópticos de deformación, tal como sensores del tipo de redes de periodo largo. También pueden usarse sensores de deformación piezoeléctricos o semiconductores, pero para turbinas eólicas es preferible usar sensores que no contienen componentes conductores de electricidad, dado que los componentes conductores de electricidad aumentan significativamente la probabilidad de impacto de rayos en la turbina eólica.

15 Los sensores de deformación están configurados para permitir una determinación del par torsor alrededor del eje longitudinal 26 de la pala 5. El procesador de señales 24 está configurado para determinar el par torsor y para comparar el par torsor con un valor de comparación o un valor esperado para el par basándose en uno o más de otros parámetros medidos que se correlacionan con el par torsor cuando la pala está funcionando bajo condiciones de funcionamiento normales.

En esta realización, el momento de flexión en la pala se usa como el parámetro que se correlaciona con el par en la pala bajo condiciones de funcionamiento normales. Pueden usarse otros parámetros, además, para mejorar la correlación, o como una alternativa al momento de flexión. Por ejemplo pueden usarse medidas de la velocidad del viento, el ángulo de ataque de las palas y la temperatura del aire como parámetros medidos.

20 La comparación puede hacerse con el par medido o con un valor que derive del mismo. Por tanto, en este ejemplo, la comparación puede hacerse entre el par medido y un par esperado derivado de la cantidad de momento de flexión en la pala, o puede hacerse entre el momento de flexión (el valor de comparación) y el valor derivado del par medido, o puede hacerse entre un valor derivado del par medido y un valor esperado derivado del momento de flexión. En otras palabras, el par medido puede manipularse matemáticamente de alguna forma antes de que se haga la comparación sin afectar a la capacidad de detectar la presencia de hielo en la pala o daños a la pala.

25 Los valores de comparación con los que se hace la comparación pueden almacenarse en una tabla de consulta en una memoria conectada al procesador o pueden calcularse continuamente a partir del parámetro o parámetros medidos. Normalmente en el diseño de una pala de turbina eólica se usan modelos informáticos complejos de las propiedades mecánicas de la pala. Estos modelos pueden basarse en el análisis de elementos finitos, por ejemplo. Estos modelos informáticos pueden usarse para proporcionar la relación entre las deformaciones medidas y el momento de flexión y el par torsor. También pueden usarse para proporcionar la relación entre el momento de flexión y el par torsor. Alternativamente, los valores para alimentar una tabla de consulta pueden derivarse mediante el funcionamiento de la turbina eólica bajo condiciones en las que se sabe que no hay hielo presente (denominadas en el presente documento condiciones de funcionamiento normales), o basándose en datos empíricos obtenidos de palas de turbina eólica de idéntico diseño. Por ejemplo, la tabla de consulta puede comprender valores de par para un intervalo de momentos de flexión medidos.

30 Si el par alrededor del eje longitudinal de la pala cae por debajo del valor de comparación por más de una cantidad predeterminada, entonces puede deducirse que está presente hielo u otra materia que interrumpe el flujo de aire en la pala. Si el par es mayor de lo esperado bajo condiciones de funcionamiento normales entonces debe haberse producido algún tipo de daño estructural a la pala.

35 La cantidad predeterminada de diferencia usada como el umbral para la determinación de acumulación de hielo puede basarse en la resolución conocida de los sensores usados y/o un valor de confianza asociado con las medidas usadas. También puede haber una cantidad de hielo o residuos en la pala que pueden tolerarse de manera segura. La cantidad predeterminada también puede basarse en variaciones conocidas en la relación entre el par y el parámetro medido debido a cambios ambientales, tales como la densidad o presión del aire, que normalmente permanecen dentro de límites conocidos.

40 Para medir el momento de flexión y el par torsor en la pala, se sitúan sensores de deformación 20 alrededor de la raíz de la pala 5. En la realización mostrada en las figuras 2 y 3, los mismos sensores 20 se usan para determinar el momento de flexión y el par. Sin embargo, pueden usarse conjuntos separados de sensores diferentes o del mismo tipo.

45 En el ejemplo mostrado en la figura 2, los sensores de deformación 20 se colocan simétricamente alrededor del eje longitudinal de la pala de turbina 5, y son equidistantes del extremo de la raíz de la pala. Colocar los sensores simétricamente, es decir con una distancia angular igual con respecto al eje longitudinal 26 de la pala, tiene ventajas en el procesamiento de las medidas de deformación de los sensores de deformación. Sin embargo, debería estar claro que la disposición simétrica de los sensores no es esencial para el funcionamiento del sistema según la presente invención. Además, si todos los sensores de deformación se sitúan en la parte redonda y homogénea de una pala de turbina próxima al buje no es necesario que todos los sensores estén igualmente distanciados del extremo de la raíz de la pala, ya que las deformaciones medidas serán las mismas independientemente de la

posición longitudinal de los sensores dentro de esa parte de sección transversal redonda de la pala. Sin embargo, si la sección transversal de la pala en la posición de los sensores no es de algún modo simétrica, entonces los sensores deberían disponerse para ser equidistantes de la raíz y de la pala.

5 Pueden derivarse el par torsor y los momentos de flexión a partir de la torsión medida y las deformaciones por flexión usando los modelos informáticos descritos anteriormente, que normalmente se basan en un análisis de elementos finitos, o se basan en datos empíricos.

10 Para medir tanto la deformación por flexión como la deformación por torsión en la raíz de la pala, se disponen los sensores de deformación en pares. Cada sensor en un par se dispone para ser sensible a la flexión en una dirección no paralela al eje longitudinal 26 de la pala. Para facilitar el procesamiento de señales los sensores 20 en cada par se disponen mejor de manera que están simétricamente dispuestos alrededor de una línea paralela al eje longitudinal de la pala. Las figuras 4a, 4b y 4c muestran posibles configuraciones de los pares de sensores.

15 La figura 4a muestra pares de sensores en forma de "V" dispuestos en la raíz de la pala. Cada par de sensores puede ser FBG, integrados en las mismas o diferentes fibras ópticas. Mediante la comparación de la deformación medida por cada sensor con la deformación medida por el otro sensor del par, pueden determinarse tanto la deformación por el momento de torsión como la deformación longitudinal (a partir de las cuales pueden derivarse los momentos de flexión). La figura 4b muestra pares de sensores en forma de "X" y la figura 4c muestran pares de sensores en forma de "V" con mayor distancia entre los sensores en cada par. Todas estas disposiciones funcionan sobre el mismo principio.

20 La deformación por flexión medida por cada par de sensores 20 se determina mediante su posición. La deformación por flexión medida por cada par de FBG es la deformación en una dirección radial, es decir, en una dirección hacia el centro de la raíz de la pala de turbina 5, aunque se deriva a partir de una medida de deformación en una dirección paralela al eje longitudinal de la pala. Esto está claramente ilustrado en la figura 3 mediante las líneas de puntos que se extienden desde cada sensor.

25 La figura 5a es una ilustración gráfica de como las medidas de deformación por flexión de los sensores se usan para proporcionar una medida de deformación por flexión resultante.

30 Los sensores de deformación FGB mostrados en las figuras 2 y 3 están afectados no solo por la deformación por flexión sino también por la deformación paralela al eje longitudinal de la pala, mediante la deformación por torsión y mediante cambios de temperatura. Antes de calcular una deformación por flexión resultante o un momento de flexión, las medidas de deformación de cada sensor se suman y entonces se dividen por el número de sensores para proporcionar una deformación promedio. Las contribuciones a la deformación como resultado de la deformación en una dirección longitudinal de una pala de turbina, por ejemplo aquellos debidos a la fuerza centrípeta, serán los mismos para todos los sensores. La contribución a las medidas de deformación de las fuerzas de flexión que actúan en el plano definido por los sensores sumará cero si los sensores están simétricamente dispuestos. Por consiguiente, la resta de la medida de deformación promedio de la medida de deformación tomada por cada uno de los sensores tendrá como resultado la eliminación de la deformación longitudinal de la medida de deformación. La deformación por torsión se elimina de las medidas de deformación mediante la suma de las medidas de deformación dentro cada par de sensores juntos. La medida de deformación resultante para cada par de sensores se denomina en el presente documento una medida de la deformación por flexión. Todavía puede requerirse compensación de temperatura, y pueden proporcionarse uno o más sensores de temperatura en la pala con ese objetivo. Pueden también proporcionarse sensores de temperatura para determinar si las condiciones son tales que la formación de hielo es una posibilidad.

45 En la figura 5a la medida de deformación por flexión de cada uno de los sensores, identificados como S1, S2, S3, S4 y S5, se ilustra como vector F1, F2, F3, F4 y F5 respectivamente. La deformación por flexión medida por cada uno de los sensores puede entenderse como una fuerza que apunta hacia la dirección radial definida por la posición de montaje del sensor. Los deformaciones por flexión se ilustran en la figura 5a como si emanaran desde un único punto, el centro de la raíz de la pala. La deformación por flexión resultante o real se ilustra mediante el vector R que comprende tanto componentes periféricas como longitudinales, y a partir del cual pueden simplemente derivarse las componentes periféricas y longitudinales. La deformación resultante R puede determinarse a partir de cinco medidas de la deformación por flexión F1 a F5. La deformación por flexión medida por cada sensor de deformación es la componente de la deformación por flexión resultante en la dirección radial definida por la posición del sensor. Esto se muestra claramente en la figura 4a en la que las líneas P1 a P5 se dibujan desde la deformación por flexión resultante R hasta cada uno de las deformaciones por flexión medidas F1 a F5, a ángulos correctos para cada uno de las deformaciones por flexión medidas. Así, una forma de calcular la deformación por flexión resultante a partir de la deformación por flexión medida es simplemente determinar donde se cruzan las líneas P1 a P5. Esto puede entenderse algebraicamente como resolver ecuaciones simultáneas para dos variables, es decir, la magnitud y dirección de la deformación por flexión resultante, a partir de cinco ecuaciones simultáneas.

Las medidas de deformación individuales pueden convertirse en momentos de flexión antes de calcular los momentos de flexión resultantes y el momento de flexión resultante promedio, en vez de calcular deformaciones por flexión resultantes y una deformación por flexión resultante promedio directamente a partir de las medidas de

deformación. Esto es útil si la relación entre la deformación por flexión y el momento de flexión no es la misma para todos los sensores. Este puede ser el caso si la sección transversal de la pala en la posición de los sensores no es simétrica y homogénea.

5 En los ejemplos mostrados en la figura 5a,  $\theta_N$  es el ángulo entre la deformación por flexión  $F_N$  medida por el sensor N ( $N= 1,2,3,4,5$ ) y la deformación resultante R medida en una dirección horario desde R (solo se muestra  $\theta_2$ ).  $|F_N|$  es la magnitud de la deformación  $F_N$  detectada por cada sensor de deformación.

Las ecuaciones simultáneas para la deformación resultante son entonces:

$$|R| = |F_1| / \cos\theta_1 = |F_2| / \cos\theta_2 = |F_3| / \cos\theta_3 = |F_4| / \cos\theta_4 = |F_5| / \cos\theta_5.$$

10 Hay una relación conocida entre  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  y  $\theta_5$  siempre que se conozca la posición de los sensores, por lo que solo hay dos incógnitas por resolver. En los ejemplos mostrados en la figura 5a hay cinco sensores igualmente distanciados de manera que  $\theta_1 = \theta_2 - 2\pi/5 = \theta_3 - 4\pi/5 = \theta_4 - 6\pi/5 = \theta_5 - 8\pi/5$ . Cuando la deformación medida es compresiva, es decir negativa, la magnitud  $|F|$  debería ser negativa.

15 Solamente se necesitan dos ecuaciones para proporcionar una solución para las dos incógnitas,  $|R|$  y  $\theta$ . Pero con N sensores, hay N ecuaciones simultáneas. Hay por tanto  $1/2N(N-1)$  pares de ecuaciones que pueden usarse para proporcionar una solución para R. Con  $N = 5$  hay 10 posibles soluciones, que se corresponden a los 10 puntos de cruce de las líneas P1 a P5. En teoría cada una de esas soluciones para  $|R|$  y  $\theta$  deberían ser idénticas. Esto se corresponde a la situación en la que cada una de las líneas P1 a P5 en la figura 5 se cruzan en exactamente el mismo punto. En realidad, no todas las soluciones para  $|R|$  y  $\theta$  serán las mismas. Esto se ilustra en la figura 5b que muestra que cada una de las líneas P1 a P5 no se cruzan en el mismo punto. Las diferentes soluciones se deben a  
20 varios tipos de problemas, incluyendo semejanza entre sensores, variaciones en las propiedades del material de la pala, resoluciones de medida y alineación de los sensores. Puede también ser el caso que uno o más de los sensores esté defectuoso o roto.

25 En lugar de seleccionar simplemente una solución como la deformación por flexión resultante, la deformación por flexión resultante puede calcularse como un promedio de todas las posibles soluciones, es decir, un promedio de todos los puntos de cruce de las líneas P1 a P5 en la figura 5b. El promedio puede ser una media simple para la magnitud y dirección, calculada sumando y dividiendo todas las posibles soluciones. Alternativamente, una distribución normal en dos dimensiones puede ajustarse a los resultados, lo que proporciona no solo un promedio conveniente sino también una medida de confianza conveniente en el resultado, basándose en la desviación estándar con respecto a la media. Otras medidas de confianza o precisión en la deformación por flexión resultante  
30 también son posibles, tales como un promedio simple de la desviación de cada resultado con respecto a la media.

35 Proporcionar una medida de confianza en la deformación por flexión resultante promedio puede ser extremadamente útil. Permite los fundamentos para una decisión sobre si detener la turbina para eliminar hielo o limpiar las palas para tener en cuenta la precisión de las medidas. Si el valor de confianza es alto de manera que hay una cantidad tolerable de hielo en la pala de turbina entonces la pala de turbina puede continuar funcionando. Si el valor de confianza es bajo, un margen de error mayor puede usarse y cualquier cantidad de hielo próxima al nivel máximo tolerable puede requerir que la turbina se detenga.

40 Un sistema según la presente invención también puede permitir que se detecten sensores defectuosos, mal instalados o rotos y que se descuenten sus medidas de los cálculos de deformación. La figura 6a es un diagrama similar al de la figura 5a, pero para un conjunto diferente de medidas de deformación a modo de ejemplo. De nuevo las medidas de deformación por flexión (del cual se han restado contribuciones de deformación de no flexión) se representan mediante las líneas F1 a F5. Se han dibujado líneas perpendiculares P1 a P5 desde los extremos de cada uno de F1 a F5, y los puntos de cruce de las líneas P1 a P5 representan posibles soluciones para la deformación por flexión resultante R. Puede verse en la figura 5a que el resultado obtenido del sensor 1, es decir deformación por flexión F1, proporciona soluciones muy diferentes de los resultados obtenidos usando combinaciones de los otros sensores. La line P1 no cruza las líneas P2, P3, P4 o P5 cerca del área en la que las líneas P2 a P5 se cruzan entre sí. La figura 6b una vista detallada de los puntos de cruce de las líneas P1 a P5 en la figura 6a. En este ejemplo, la medida de deformación F1 es claramente errónea y debería ignorarse. La deformación por flexión resultante puede calcularse mejor usando solamente las medidas de los sensores 2 a 5, es decir deformaciones por flexión F2 a F5, como se ilustra.

50 Para determinar si una medida de deformación particular es incorrecta o no, las soluciones para la deformación por flexión resultante R proporcionada usando esa medida de deformación se comparan con la solución promedio para R. Si la diferencia entre los resultados usando uno de los sensores de deformación son todos (o alternativamente de media) mayores que un valor de diferencia umbral, entonces pueden descartarse las medidas de ese sensor de deformación y los cálculos (incluyendo esos cálculos que eliminan contribuciones de deformación de no flexión de  
55 las medidas de deformación) se repiten sin la participación del sensor defectuoso. El valor umbral puede fijarse como un valor absoluto o como un número de desviaciones estándar con respecto al valor medio o cualquier otro

5 método adecuado, tal como una proporción de la deformación por flexión resultante promedio. Este proceso de comparación de cada resultado con un resultado promedio puede automatizarse totalmente en el procesador de señales y puede proporcionar un valor de confianza para cada sensor y proporcionar una alerta cuando se detecta un sensor defectuoso, es decir, cuando se excede el nivel umbral. Esto permite que el sistema proporcione resultados más precisos y proporcione unos diagnósticos automáticos.

Incluso si no se encuentra ningún sensor defectuoso, se puede proporcionar un valor de confianza para cada sensor de deformación a una unidad de diagnóstico externa para el análisis posterior.

10 Aunque se han descrito métodos específicos para calcular la deformación media y valores de confianza de deformación, puede usarse cualquier método adecuado para dar una deformación por flexión resultante y valores de confianzas tanto en la deformación por flexión promedio como en las medidas de cada sensor individual.

15 Para proporcionar la capacidad de calcular deformación por flexión resultante de manera precisa mientras se descartan medidas de uno o más de los sensores de deformación disponibles, deben proporcionarse sensores de deformación suficientes. El número mínimo de sensores FBG de deformación necesarios para proporcionar una medida de deformación por flexión resultante en dos dimensiones es tres sensores FBG. Para proporcionar redundancia, tienen que proporcionarse más de tres sensores de deformación. En una realización preferida se proporcionan cinco o más sensores. Cuantos más sensores se proporcionen mayor la resolución, la precisión y la confianza de la medida que puede obtenerse y menor el umbral fijado para descartar medidas erróneas.

**REIVINDICACIONES**

1. Método de monitorización de la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:  
 5        ubicar al menos tres sensores de deformación en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación  
 calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;  
 calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes; y  
 10        calcular un valor de confianza para un primer sensor basándose en una comparación de deformaciones por flexión resultantes derivadas de la medida de deformación del primer sensor con la deformación por flexión resultante promedio.
2. Método según la reivindicación 1, en el que las medidas de deformación individuales se convierten en momentos de flexión antes de calcular los momentos de flexión resultantes y el momento de flexión resultante promedio.  
 15
3. Método según la reivindicación 1 ó 2, en el que el valor de confianza se basa en una diferencia absoluta entre las deformaciones por flexión resultantes derivadas de la medida del primer sensor con la deformación por flexión resultante promedio.
4. Método según la reivindicación 1 ó 2, en el que el valor de confianza se basa en un número de desviaciones estándar relativo a la medida de deformación por flexión del primer sensor con respecto a la deformación por flexión resultante promedio.  
 20
5. Método según cualquier reivindicación anterior, que comprende además ubicar al menos cuatro sensores de deformación en la pala de turbina; y que comprende además la etapa de comparar el valor de confianza con un umbral de confianza, y si el valor de confianza es menor que el umbral de confianza, recalculando una deformación por flexión resultante promedio sin usar la medida de deformación del primer sensor de deformación.  
 25
6. Método según cualquier reivindicación anterior, que comprende además la etapa de calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio.
7. Método según la reivindicación 6, en el que el valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio se basa en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí, o con la deformación por flexión resultante promedio.  
 30
8. Método según cualquier reivindicación anterior, que comprende además calcular componentes de no flexión de las medidas de deformación de los sensores de deformación.
9. Método de monitorización de la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:  
 35        ubicar al menos tres sensores de deformación en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación;  
 calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;  
 40        calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes; y  
 calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio basándose en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí o con la deformación por flexión resultante promedio.
10. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que cada deformación por flexión resultante se calcula a partir de las medidas de deformación por flexión tomadas desde un par diferente de sensores de deformación, donde los sensores de deformación en cada par proporcionan medidas de deformación por flexión en direcciones no paralelas entre sí.  
 45
11. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que todos los sensores se colocan sustancialmente equidistantes del extremo de la raíz de la pala.  
 50

12. Sistema para monitorizar la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:
- al menos tres sensores de deformación ubicados en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación; y
- un procesador de señales conectado a cada uno de los sensores de deformación, estando el procesador de señales configurado para:
- calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;
- calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes; y
- calcular un valor de confianza para un primer sensor basándose en una comparación de deformaciones por flexión resultantes derivadas de la medida de deformación del primer sensor con la deformación por flexión resultante promedio.
13. Sistema según la reivindicación 12, en el que el sistema comprende al menos cuatro sensores de deformación en la pala de turbina, y el procesador de señales está configurado además para comparar el valor de confianza con un umbral de confianza, y si el valor de confianza es menor que el umbral de confianza, recalculer una deformación por flexión resultante promedio sin usar la medida de deformación del primer sensor de deformación.
14. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 12 ó 13, en el que el procesador de señales está configurado además para calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio.
15. Sistema según la reivindicación 14, en el que el procesador de señales está configurado para calcular el valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio basándose en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí, o con la deformación por flexión resultante promedio.
16. Sistema para monitorizar la deformación por flexión en una pala de turbina eólica, que comprende:
- al menos tres sensores de deformación ubicados en la pala de turbina, proporcionando cada sensor de deformación, durante el uso, una medida de deformación, estando los sensores de deformación ubicados de manera que puede determinarse la flexión periférica y longitudinal a partir de las medidas de deformación; y
- un procesador de señales conectado a cada uno de los sensores de deformación, estando el procesador de señales configurado para:
- calcular una pluralidad de deformaciones por flexión resultantes usando las medidas de deformación;
- calcular una deformación por flexión resultante promedio a partir de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes; y
- calcular un valor de confianza para la deformación por flexión resultante promedio basándose en una comparación de la pluralidad de deformaciones por flexión resultantes entre sí o con la deformación por flexión resultante promedio.
17. Sistema según la reivindicación 16, en el que la pluralidad de sensores de deformación comprende al menos un par de sensores de deformación adyacentes colocados en la pala de manera que sus ejes sensibles no sean paralelos con el eje longitudinal de la pala.

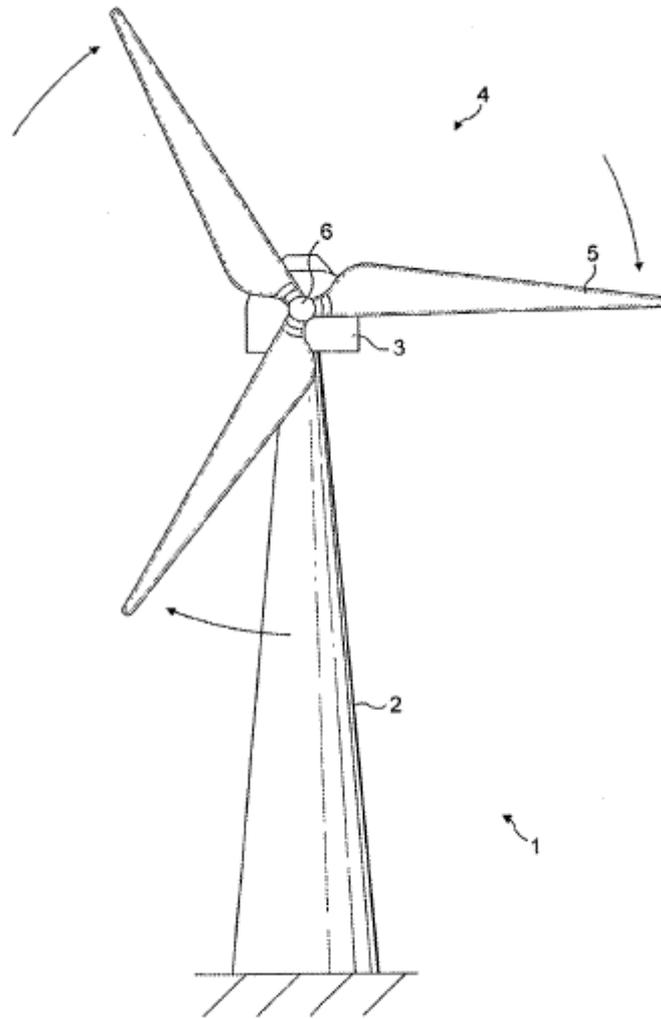
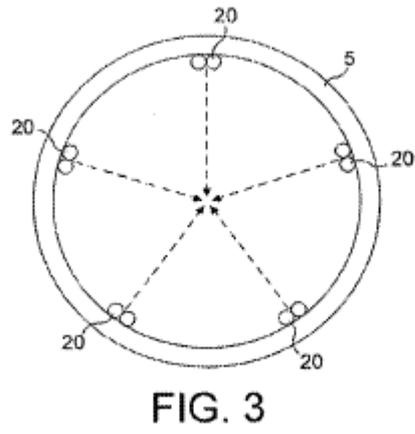
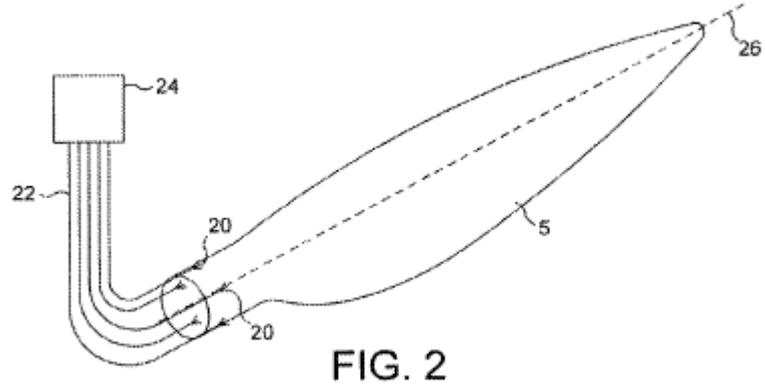


FIG. 1



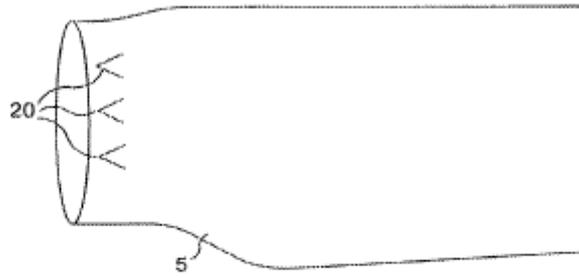


FIG. 4a

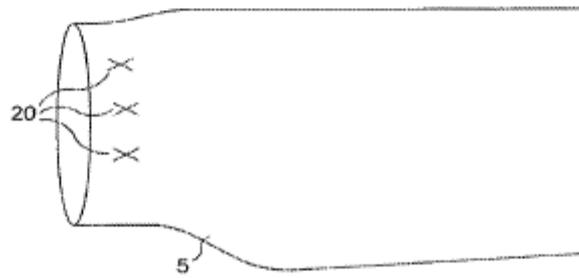


FIG. 4b

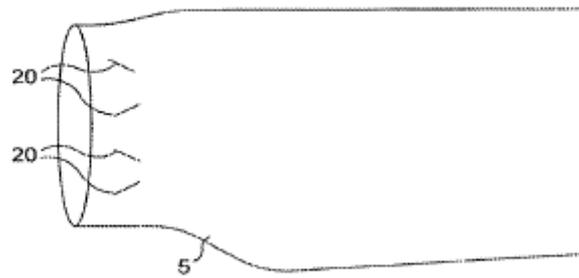


FIG. 4c

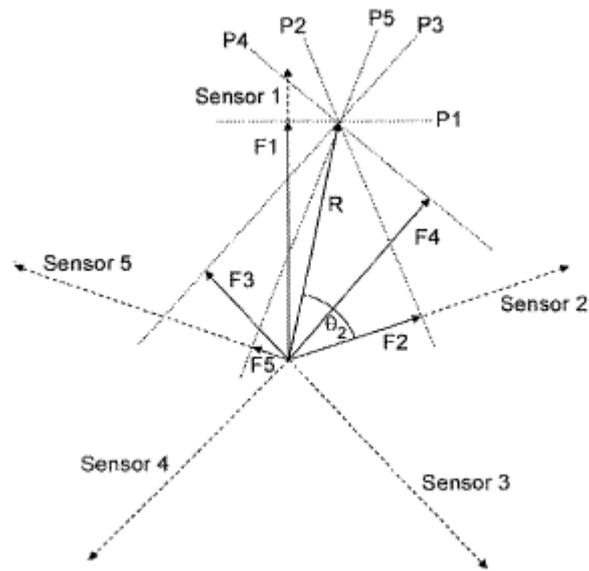


FIG. 5a

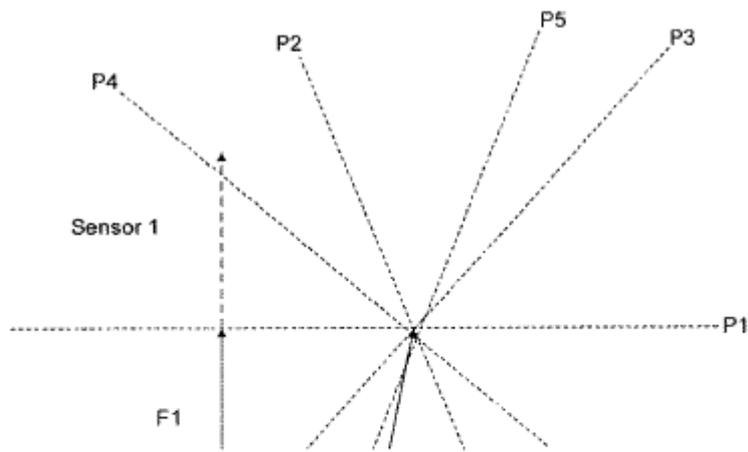


FIG. 5b

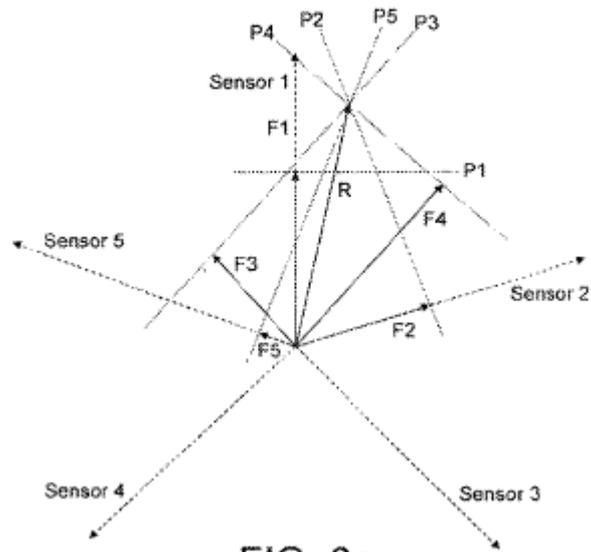


FIG. 6a

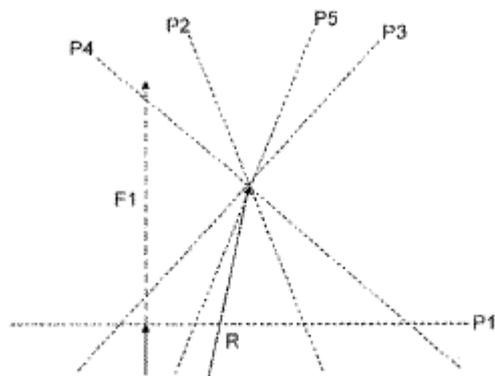


FIG. 6b