

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 662 330**

51 Int. Cl.:

F03D 17/00 (2006.01)

G01M 5/00 (2006.01)

G01L 3/10 (2006.01)

G01D 3/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.11.2011** **E 11187529 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2018** **EP 2589943**

54 Título: **Métodos y sistemas para detectar modos de falla de sensor**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
06.04.2018

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

CAPONETTI, FABIO;
BRATH, PER;
HAMMERUM, KELD y
NIELSEN, JOHNNY

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 662 330 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

Métodos y sistemas para detectar modos de falla de sensor

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere generalmente a métodos y sistemas para detectar modos de falla en un sensor, y en particular, a métodos y sistemas para detectar modos de falla en un sensor de fibra óptica usado para medir un momento de flexión experimentado por una pala de un generador de turbina eólica (WTG).

Antecedentes de la invención

10 Muchos generadores de turbina eólica (WTG) actuales están equipados con palas generalmente largas y delgadas que están diseñadas para flexionarse o doblarse en respuesta a fuerzas de viento. Aunque se espera cierta flexión, la pala puede sufrir daños si su flexión sobrepasa un límite extremo o es demasiado frecuente. El riesgo de tal daño es mayor en proporción con el tamaño en aumento de las palas usadas en WTG actuales. Por tanto, para detectar situaciones de flexión, entre otros motivos, las palas WTG actuales están equipadas en ocasiones con sensores de medición de momento de flexión que miden un momento de flexión experimentado en uno o más puntos a lo largo del alcance de cada pala. Para evitar una interferencia electromagnética los sensores se implementan habitualmente usando redes de bragg de fibra (FBG) en un cable de fibra óptica.

15 Los sensores de momento de flexión no se limitan a su uso con palas de un WTG. Por tanto, el uso de sensores de momento de flexión con palas de WTG es simplemente un uso a modo de ejemplo. Otro uso a modo de ejemplo incluye la medición de un momento de flexión en un conducto, tal como una tubería marítima usada en la exploración de petróleo en aguas profundas, o cualquier otra estructura que tenga una forma generalmente larga delgada usada de una manera y/o entorno que expone la estructura a cargas con cambios frecuentes y/o cargas extremas. Un problema asociado con el uso de cualquier sensor es el riesgo de que el sensor entre en un modo de falla. Un modo de falla es un modo en el que el sensor se comporta de manera que se desvía de su comportamiento nominal. El comportamiento nominal es el que cumple todos los requisitos impuestos por los sistemas que, de manera directa o indirecta, hacen uso de la salida de sensor. Por tanto, el riesgo de fallo o rendimiento mediocre para cualquiera de tales sistemas aumentará si el sensor entra en un modo de falla. Por consiguiente, la identificación de una situación de un modo de falla puede ayudar a reducir el riesgo de fallo y mejorar el rendimiento. Además, la reducción del riesgo de fallo y el rendimiento mediocre es útil para WTG actuales porque funcionan en ubicaciones remotas, haciendo que la realización de tareas de mantenimiento técnicas sea difícil y costosa, y habitualmente se requiere que tengan periodos de funcionamiento largos, por ejemplo, veinte años.

20 25 30 La publicación de patente alemana DE102004044335 describe un método de monitorización de señales de sensor redundantes en el que señales de señales primera y segunda se comparan para validar una condición de error, y se realiza una comparación con una referencia para identificar el sensor defectuoso particular.

35 La publicación de solicitud de patente estadounidense número 2010/0232961 (la publicación de patente '961) describe un sensor de fibra óptica que se usa para medir un momento de flexión experimentado por una pala de un WTG. La fibra óptica usada en la publicación de patente '961 tiene dos puntos de salida alternativos, pudiendo conectarse cada uno a un dispositivo de procesamiento de datos. Por consiguiente, en el caso de una ruptura en la fibra óptica, señales procedentes del sensor están disponibles desde al menos uno de los puntos de salida.

40 45 La publicación de patente '961 parece dirigirse a una situación de solamente un modo de falla, concretamente, ruptura de fibra óptica. Sin embargo, pueden producirse otros modos de falla de sensor, tal como pérdida de energía completa o parcial en la salida de sensor, pérdida de calibración de sensor, y/o errores de procesamiento de señal. Además, los modos de falla de un sensor pueden manifestarse en un nivel alto (es decir, en un nivel que tiene en cuenta datos externos o datos distintos de los que están disponibles procedentes del sensor) o en un nivel bajo (es decir, en un nivel que tiene en cuenta datos internos o datos disponibles procedentes de o que solamente pertenecen al sensor). Identificar otros modos de falla ayudará a aumentar un rendimiento fiable y a reducir el riesgo de fallo y los costes de reparación asociados. Además, la capacidad de distinguir entre diferentes modos de falla y modos de falla en diferentes niveles mejoraría la capacidad de identificar la aplicación de técnicas de diagnóstico apropiadas.

Sumario de la invención

50 55 Según un primer aspecto la invención proporciona un método de detección de un modo de falla de un sensor. El sensor puede ser, por ejemplo, un sensor de momento de flexión y puede detectar un momento de flexión de una pala en un generador de turbina eólica (WTG). El método incluye comparar una salida de datos por un primer sensor con datos de referencia que indican lo que pretende emitirse mediante el primer sensor para producir un primer resultado de comparación y comparar una salida de datos por el primer sensor con una salida de datos por un segundo sensor para producir un segundo resultado de comparación. Se realiza una determinación de si el primer sensor ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en los resultados de comparación primero y segundo. Al detectar un modo de falla del sensor el riesgo de confianza indebida en el sensor puede reducirse de manera puntual sin necesidad de acudir a servicios técnicos.

5 El primer sensor detecta un momento de flexión experimentado por una primera pala del WTG, y el segundo sensor detecta uno de: un momento de flexión experimentado por una segunda pala del WTG, una velocidad de rotación de un generador del WTG, una aceleración de una góndola del WTG, una aceleración de la pala del WTG, una fuerza de empuje de viento en el WTG, una velocidad de rotación de un rotor del WTG, y un ángulo de cabeceo de al menos una de las palas del WTG, o uno de una característica de entorno que es una de: una velocidad de viento, una dirección de viento, una densidad de aire que rodea el WTG, y una temperatura de aire que rodea el WTG.

En aún otra realización del método según el primer aspecto de la invención, el método incluye además enviar una indicación del modo de falla detectado a un controlador que realiza operaciones de control en función de la salida de datos por el primer sensor.

10 En aún otra realización del método según el primer aspecto de la invención, el método incluye además enviar una indicación del modo de falla detectado a un controlador del primer sensor, y compensar, en el controlador de sensor, el modo de falla detectado.

15 Según un segundo aspecto la invención proporciona un método para detectar modos de falla de un sensor de momento de flexión para una pala de un WTG. El método incluye hacer funcionar el sensor para generar datos que representan un momento de flexión experimentado por la pala, y comparar los datos generados por el sensor con datos de referencia que indican lo que se espera que se genere por el sensor para producir un resultado de comparación. Se realiza una determinación con respecto a si el sensor ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en el resultado de comparación.

20 En una realización según el segundo aspecto de la invención, el sensor incluye una red de bragg de fibra (FBG) configurada para colocarse en una superficie de la pala y conjunto de circuitos de sensor configurado para acoplarse ópticamente a la FBG mediante una fibra óptica. Además, el conjunto de circuitos de sensor incluye una fuente lumínica configurada para emitir una señal lumínica y un receptor de luz configurado para recibir una reflexión de la señal lumínica desde la FBG y para convertir la señal lumínica reflejada en los datos generados por sensor. La comparación de los datos generados por sensor con los datos de referencia para producir un resultado de comparación puede incluir comparar un nivel de energía de señal indicado por los datos generados por sensor con un nivel de energía de señal indicado por los datos de referencia para producir un resultado de comparación de energía. En una realización adicional, el método incluye además modificar una salida de energía mediante la fuente lumínica en respuesta a la determinación de que el sensor ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en el resultado de comparación de energía.

30 En una realización alternativa según el segundo aspecto de la invención, el sensor incluye la FBG y el conjunto de circuitos de sensor descritos anteriormente. Sin embargo, en esta realización alternativa, la comparación de los datos generados por sensor con los datos de referencia incluye comparar una frecuencia de señal media indicada por los datos generados por sensor con una frecuencia de señal media indicada por los datos de referencia para producir un resultado de comparación de frecuencia media. En una realización adicional, el método incluye además compensar un desvío de frecuencia del sensor en respuesta a la determinación de que el sensor ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en el resultado de comparación de frecuencia media.

35 Según un tercer aspecto la invención proporciona un método para detectar modos de falla en uno o más de una pluralidad de sensores. El método incluye hacer funcionar sensores primero y segundo, produciendo al menos el primer sensor datos que representan un momento de flexión experimentado por una pala del WTG, y comparar una salida de datos por el primer sensor con una salida de datos por el segundo sensor para producir un resultado de comparación. Se realiza entonces una determinación con respecto a si el primer sensor ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en el resultado de comparación.

40 En una realización según el tercer aspecto de la invención, el primer sensor incluye una FBG configurada para colocarse en una superficie de la pala y conjunto de circuitos de sensor configurado para acoplarse ópticamente a la FBG mediante una fibra óptica. El conjunto de circuitos de sensor incluye una fuente lumínica configurada para emitir una señal lumínica, y un receptor de luz configurado para recibir una reflexión de la señal lumínica desde la FBG y para convertir la señal lumínica reflejada en los datos que representan el momento de flexión experimentado por la pala.

45 Según un cuarto aspecto la invención proporciona un aparato para detectar modos de falla en un primer sensor. El aparato comprende conjunto de circuitos de detección de falla de nivel bajo y conjunto de circuitos de detección de falla de nivel alto. El conjunto de circuitos de detección de falla de nivel bajo se configura para comparar una salida de datos por el primer sensor con datos de referencia producidos por el primer sensor al tiempo que hace funcionar el primer sensor en un entorno controlado. Un modo de falla del primer sensor puede detectarse basándose al menos en parte en la comparación. Además, el conjunto de circuitos de detección de falla de nivel alto se configura para comparar una salida de datos por el primer sensor con una salida de datos por un segundo sensor para detectar un modo de falla del primer sensor.

Según un quinto aspecto la invención proporciona un WTG con una detección de falla de sensor de nivel bajo. El WTG incluye una pala configurada para rotar en respuesta a una fuerza de viento y un sensor configurado para

usarse en la medición de un momento de flexión experimentado por la pala. El WTG incluye además conjunto de circuitos de detección de falla que se configura para comparar una salida de datos por el sensor durante el funcionamiento con los datos de referencia para determinar si el sensor ha entrado en un modo de falla.

5 Según un sexto aspecto la invención proporciona un WTG con una detección de falla de sensor de nivel alto. El WTG incluye una primera pala configurada para rotar en respuesta a una fuerza de viento y un primer sensor configurado para usarse en la medición de un momento de flexión experimentado por la primera pala. El WTG incluye además un conjunto de circuitos de detección de falla que se configura para comparar una salida de datos por el primer sensor con una salida de datos por un segundo sensor para determinar si el primer sensor ha entrado en un modo de falla.

10 En una realización según el sexto aspecto de la invención, el WTG comprende además una segunda pala y el segundo sensor se configura para usarse en la medición de un momento de flexión experimentado por la segunda pala.

En otra realización según el sexto aspecto de la invención, el segundo sensor se configura para usarse en la medición de una característica del WTG distinta de un momento de flexión experimentado por una pala.

15 En aún otra realización según el sexto aspecto de la invención, el segundo sensor se configura para usarse en la medición de una característica del entorno en el que se ubica el WTG.

Breve descripción de los dibujos

La invención se comprenderá mejor con referencia a la descripción detallada cuando se toma en consideración junto con los ejemplos no limitativos y los dibujos adjuntos.

20 La figura 1 muestra una estructura general de un WTG, que es una estructura a modo de ejemplo que usa sensores para que pueda detectarse un modo de falla.

La figura 2 muestra un sistema para detectar un modo de falla para un sensor de carga en un WTG, tal como el WTG de la figura 1.

La figura 3 muestra una vista más detallada de determinadas partes del sistema en la figura 2.

25 La figura 4 muestra una gráfica en la que se representa tanto una señal nominal a modo de ejemplo como una señal defectuosa a modo de ejemplo que pueden producirse por el sensor de carga en las figuras 2 y 3.

La figura 5 ilustra un diagrama de flujo que representa un método a modo de ejemplo de detección de si un sensor ha entrado en un modo de falla.

Descripción detallada de la invención

30 La siguiente descripción es una descripción detallada de realizaciones de la invención representadas en los dibujos adjuntos. Las realizaciones son ejemplos y se encuentran detalladas de tal manera que comuniquen de manera clara la invención.

35 Los generadores de turbina eólica (WTG) se someten a cargas debido a fuerzas de viento, movimiento de rotación, gravedad y similares. Habitualmente, esta carga no es deseable y, por tanto, se monitoriza a menudo y en ocasiones se controla con el uso de sensores. Por ejemplo, las palas de algunas turbinas eólicas actuales tienen sensores o galgas de esfuerzo montados normalmente en una superficie interior de las mismas. Los sensores de esfuerzo pueden medir e informar a un controlador central de una cantidad de esfuerzo experimentado por la pala. Sin embargo, los WTG se encuentran, a menudo, en ubicaciones remotas y se diseñan para funcionar con poco mantenimiento y supervisión. Por tanto, una situación de un modo de falla en un sensor puede eludir la detección. Si el control del WTG depende de un sensor que experimenta un modo de falla, el WTG puede funcionar de manera ineficaz, o peor, puede sufrir daños. Pueden usarse métodos y sistemas a modo de ejemplo descritos en el presente documento para detectar modos de falla de un sensor en un WTG, facilitando de este modo el poder evitar tales riesgos.

45 La figura 1 ilustra un WTG 100 a modo de ejemplo según una realización. Tal como se ilustra en la figura 1, el WTG 100 incluye una torre 110, una góndola 120, y un rotor 130. En una realización, el WTG 100 puede ser una turbina eólica terrestre. Sin embargo, realizaciones de la invención no solamente se limitan a turbinas eólicas terrestres. En realizaciones alternativas, la turbina eólica 100 puede ser una turbina eólica marítima ubicada sobre un cuerpo acuático tal como, por ejemplo, un lago, un océano, o similares. La torre 110 de una turbina eólica marítima de este tipo se instala o bien en el fondo marino o en plataformas estabilizadas en o por encima del nivel del mar.

50 La torre 110 del WTG 100 puede configurarse para elevar la góndola 120 y el rotor 130 hasta una altura en la que un flujo de aire fuerte, menos turbulento y, generalmente no obstruido, puede recibirse por el rotor 130. La altura de la torre 110 puede ser cualquier altura razonable, y debe tener en cuenta la longitud de las palas de turbina eólica que se extienden desde el rotor 130. La torre 110 puede estar realizada de cualquier tipo de material, por ejemplo, acero,

hormigón, o similares. En algunas realizaciones la torre 110 puede estar realizada de un material monolítico. Sin embargo, en realizaciones alternativas, la torre 110 puede incluir una pluralidad de secciones. En algunas realizaciones de la invención, la torre 110 puede ser una torre enrejada. Por consiguiente, la torre 110 puede incluir perfiles de acero soldados.

5 El rotor 130 puede incluir un buje de rotor (a continuación en el presente documento denominado simplemente "buje") 132 y al menos una pala 140 (tales tres palas 140 se muestran en la figura 1). El buje de rotor 132 puede configurarse para acoplar la al menos una pala 140 a un árbol (no mostrado). En una realización, las palas 140 pueden tener un perfil aerodinámico de manera que, a velocidades de viento predeterminadas, las palas 140 experimentan una elevación, provocando de este modo que las palas roten radialmente alrededor del buje. El buje 10 132 puede comprender además mecanismos (no mostrados) para ajustar el cabeceo de la pala 140 para aumentar o reducir la cantidad de energía de viento captada por la pala 140. La realización del cabeceo ajusta el ángulo en el que el viento impacta en la pala 140. En determinadas realizaciones, sin embargo, los mecanismos de cabeceo pueden omitirse y, por consiguiente, el cabeceo de las palas 140 no puede ajustarse en tales realizaciones.

15 El buje 132 normalmente rota alrededor de un eje sustancialmente horizontal a lo largo de un árbol de accionamiento (no mostrado) que se extiende desde el buje 132 hasta la góndola 120. El árbol de accionamiento se acopla, habitualmente, a uno o más componentes en la góndola 120, que se configuran para convertir la energía de rotación del árbol en energía eléctrica.

Aunque el WTG 100 mostrado en la figura 1 tiene tres palas 140, debe observarse que un WTG puede tener un número de palas diferente. Es habitual encontrar WTG que tienen de dos a cuatro palas. El WTG 100 mostrado en la 20 figura 1 es una turbina eólica de eje horizontal (HAWT) ya que el rotor 130 rota alrededor de un eje horizontal. Debe observarse que el rotor 130 puede rotar alrededor de un eje vertical. Un WTG de este tipo cuyo rotor rota alrededor del eje vertical se conoce como turbina eólica de eje vertical (VAWT). Las realizaciones de WTG descritas de aquí en adelante no se limitan a las HAWT que tienen 3 palas. Pueden implementarse tanto como HAWT como VAWT, que tienen cualquier número de palas 140 en el rotor 130.

25 Cada una de las palas 140 también puede estar equipada con un sensor de momento de flexión 142 (es decir, un sensor de carga), tal como un sensor de vibración, acelerómetro, galga extensiométrica o cualquier otro tipo de sensor que pueda medir al menos una magnitud de un momento de flexión experimentado por una pala de WTG. El sensor de momento de flexión 142 puede colocarse en un extremo de raíz de la pala para detectar el esfuerzo debido a un momento de flexión de aleteo de la pala, es decir, un momento que provoca que la pala se desvíe en 30 una dirección normal con respecto al plano del rotor 130. Aunque la turbina eólica 100 se representa como que tiene solamente un sensor de momento de flexión 142 en cada pala 140, pueden incluirse múltiples sensores de momento de flexión 142 en cada pala (o menos que cada pala) en diversas posiciones, por ejemplo, al 20%, 40%, 50%, 60%, 75% y 80% del radio de pala con respecto a la raíz de pala. Además, al menos algunos de los múltiples sensores de momento de flexión 142 (o, alternativamente, al menos un sensor de momento de flexión adicional) pueden 35 colocarse para medir un momento de flexión de borde, es decir, un momento que provoca que la pala se desvíe en una dirección sustancialmente dentro del plano del rotor 130, en lugar de un momento de flexión de aleteo. Alternativamente, solamente una única pala de las palas 140 puede estar equipada con uno o más sensores de momento de flexión 142.

40 Adicionalmente, además de para colocar uno o más sensores de momento de flexión 142 en o dentro de cada pala 140, uno o más sensores adicionales pueden usarse para controlar o almacenar datos sobre el funcionamiento del WTG 100 o su entorno de funcionamiento. Por ejemplo, el WTG 100 puede incluir un sensor en la parte trasera de la góndola 120 en forma de un acelerómetro. El acelerómetro puede montarse de tal manera que el acelerómetro mide oscilaciones horizontales o sustancialmente horizontales de la góndola, que pueden resultar de oscilaciones en los bordes de las palas. Otros sensores posibles incluyen un sensor de velocidad de viento, un sensor de dirección de 45 viento, un sensor de fuerza de empuje de viento, un sensor de velocidad de generador, un sensor de temperatura, un sensor de densidad de aire, un sensor de detección de ubicación de WTG (por ejemplo, un receptor de GPS), un sensor de ángulo de cabeceo de pala, un sensor de ángulo de ataque de pala, un sensor de aceleración de parte superior de torre, un sensor de velocidad de rotor, etc. Además, algunos sensores incluidos en el WTG pueden configurarse para usarse para medir determinadas características del WTG (que incluyen, por ejemplo, 50 características que los sensores anteriores miden más directamente) basándose en un modelo físico y/o conocimiento de parámetros de funcionamiento, tales como la altitud de WTG, inercia y masa de pala, longitud de pala, y/o un cociente de caja de engranajes. Los sensores diferentes a los sensores de momento de flexión 142 se denominan en ocasiones en la descripción y figuras como "otros sensores" por motivos de brevedad.

55 La figura 2 muestra un diagrama de bloques funcional de un sistema a modo de ejemplo 200 que implementa un método a modo de ejemplo de detección de modos de falla de uno o más sensores. La figura 3 muestra un diagrama de bloques funcional de determinados componentes en el sistema 200 en más detalle. Por tanto, la siguiente descripción del sistema 200 se realiza con referencia a ambas figuras 2 y 3.

60 En el sistema a modo de ejemplo mostrado, el uno o más sensores son sensores de momento de flexión de pala 142 (es decir, sensores de carga) en palas del WTG 100. Sin embargo, el sistema 200 no se limita al uso con sensores de carga en palas de un WTG y, en su lugar, puede usarse en otros contextos y con otros tipos de

sensores. Además, debe observarse que el número de palas n mostrado en la figura 2 puede ser cualquier número entero positivo. Además, el número de sensores de carga m puede ser cualquier número entero positivo y puede ser diferente del número de palas n . Por ejemplo, menos de todas las palas pueden estar equipadas con sensores de carga. Alternativamente, cada pala puede estar equipada con un sensor de carga. Además, o alternativamente, uno o más componentes adicionales del WTG (por ejemplo, la torre) pueden estar equipados con un sensor de carga correspondiente.

El sistema 200 también incluye detectores de fallo de nivel bajo 220 para cada sensor de carga y un detector de fallo de nivel alto 240. Los sensores de carga 142, los detectores de fallo de nivel bajo 220, y el detector de fallo de nivel alto 240 producen salidas que se alimentan a un controlador de WTG 230 que a su vez produce una o más salidas que se alimentan a uno o más accionadores de WTG u otros componentes que pueden controlarse. Por ejemplo, los sensores de carga 142 generan datos de momento de flexión (también denominados en el presente documento datos de deformación) que se alimentan al controlador de WTG 230 y el controlador de WTG 230 envía órdenes a accionadores, tales como accionadores de cabeceo que controlan el cabeceo de pala, en función de los datos de momento de flexión para controlar el momento de flexión experimentado por las palas. Los accionadores de cabeceo pueden controlarse de manera individual o colectiva. Otros accionadores que pueden controlarse en función de datos de momento de flexión incluyen componentes y motores de guiñada que afectan al par, la velocidad y/o la energía del generador.

Cada sensor de carga 142 puede experimentar modos de falla durante el funcionamiento. Los detectores de fallo de nivel bajo 220 y el detector de fallo de nivel alto 240 se configuran para detectar al menos algunos de los modos de falla, detectando el detector de fallo de nivel alto 240 modos de falla que pueden haberse perdido los detectores de fallo de nivel bajo 220 (y viceversa). Cada detector de fallo de nivel bajo 220 se asocia con un sensor de carga 142 correspondiente. Cada detector de fallo de nivel bajo 220 compara una salida de datos por el sensor correspondiente de los sensores de carga 142 con datos de referencia que se espera que se emitan por el sensor de carga 142. Cada detector de fallo de nivel bajo 220 realiza la comparación y produce un resultado de comparación (es decir una indicación de validez de nivel bajo) que indica si los datos de salida coinciden con los datos de referencia. La comparación puede implementarse usando una prueba estadística, tal como una prueba de cociente de verosimilitud generalizado o una prueba de sumas acumuladas. La prueba estadística puede diseñarse para detectar pequeños cambios con una probabilidad diseñada de detección perdida y/o falsa alarma. Por consiguiente, los datos de referencia pueden proporcionarse en forma de un valor medio y, opcionalmente, pueden incluir un valor de varianza derivado de un número significativo estadísticamente de muestras de salida.

La indicación de validez de nivel bajo se alimenta al controlador de WTG 230. Basándose al menos en parte en la indicación de validez de nivel bajo, el controlador de WTG 230 determina si el sensor de carga 142 ha entrado en un modo de falla y opcionalmente puede tomar medidas para abordar el modo de falla, por ejemplo, controlando el sensor de carga defectuoso para compensar el modo de falla y/o reduciendo o eliminando la dependencia de cualquiera de sus operaciones de control de accionador en la salida del sensor de carga defectuoso. La indicación de validez de nivel bajo puede producirse en forma de una tabla de verdad que enumera un valor binario (por ejemplo, válido/no válido) para cada uno de una pluralidad de modos de falla posibles, o puede ser en forma de valores clasificados o de múltiples niveles que indican un grado en el que está funcionando el sensor de carga en un modo de falla para cada modo de falla posible. Alternativamente, la indicación de validez de nivel bajo puede ser cualquier combinación de una tabla de verdad y valores clasificados. A continuación, se comentan modos de falla a modo de ejemplo con referencia a las figuras 3 y 4.

Los datos de referencia pueden derivarse usando un modelo derivado del conocimiento de las propiedades del sensor. Por ejemplo, los datos de referencia pueden obtenerse basándose en el diseño y/o parámetros de especificación proporcionados en la documentación producida por un fabricante del sensor y/o a partir de condiciones observadas en las que funciona el sensor. Alternativamente, los datos de referencia pueden producirse por cada sensor durante una fase de inicio en la que cada sensor de carga 142 se hace funcionar en un entorno controlado. El entorno controlado puede ser aquel en el que la pala no experimenta sustancialmente ningún momento de flexión o carga. Un entorno de este tipo puede lograrse, por ejemplo, realizando el cabeceo de las palas en una dirección determinada, esperando hasta que haya muy poco o no haya nada de viento, o en una instalación de fabricación durante una fase de montaje del WTG. Alternativamente, si el rendimiento de cada sensor de carga 142 tiene de poca a ninguna variación con respecto al rendimiento de otros sensores de carga 142, los datos de referencia para todos los detectores de fallo de nivel bajo 220 pueden proporcionarse mediante el funcionamiento de un único sensor de los sensores de carga 142 o mediante el funcionamiento de un sensor de carga de referencia que no se proporciona en el WTG 100.

Además, cada detector de fallo de nivel bajo 220 puede incluir en el mismo un módulo de memoria que almacena los datos de referencia. Alternativamente, el sistema 200 puede incluir un único módulo de memoria que almacena los datos de referencia para cada detector de fallo de nivel bajo 220 como referencia y para usarse durante su operación de comparación. Además, aunque se muestran múltiples sensores de carga en el sistema 200, también se contemplan realizaciones que tienen solamente un único sensor de carga asociado con una única pala de un WTG con múltiples palas.

Tal como se muestra en la figura 3, los sensores de carga 142 pueden implementarse usando conjunto de circuitos

de sensor 310 y una fibra óptica 320 que tiene una o más máscaras de fase, que pueden tener forma de redes de bragg de fibra (FBG) 330. Para evitar una complejidad indebida, la figura 2 representa la totalidad de cada uno de los sensores de carga 142 ubicados dentro de una parte central hueca de una pala del WTG 100. Sin embargo, tal como se muestra en la figura 3, solamente las FBG 330 de cada sensor de carga 142 y una parte de la fibra óptica 320 pueden realmente ubicarse dentro de la pala correspondiente. El conjunto de circuitos de sensor 310 puede encontrarse en un buje central o en cualquier otro sitio en el WTG 100 y puede acoplarse de manera comunicativa a las FBG 330 mediante una parte de la fibra óptica 320. En una realización los sensores de carga 142 se implementan con FBG 330 y conjunto de circuitos de sensor 310 que se fabrican por Ibsen Photonics, una sociedad cuya sede principal se encuentra en Ryttermarken 15-21, DK-3520 Farum, Dinamarca. Por ejemplo, puede usarse el monitor de consulta I-MON 80D de Ibsen Photonics.

El conjunto de circuitos de sensor 310 incluye un monitor de consulta 311, que a su vez incluye una fuente lumínica 312 (por ejemplo, un diodo superluminiscente (SLED) o una fuente de emisión espontánea amplificada (ASE)), un elemento de circulación óptico 314, un monitor de espectro 316, y un conjunto de circuitos de control 318 que controla el funcionamiento de la fuente lumínica 312 y el monitor de espectro 316. Además, el conjunto de circuitos de sensor 310 incluye un convertor 319 que convierte una salida del monitor de consulta 311 en datos de momento de flexión que se envían al controlador de WTG 230. Aunque la fibra óptica 320 se muestra como que proporciona un enlace entre el monitor de consulta 311 y las FBG 330 de un único sensor de carga en una única pala, el monitor de consulta 311 puede estar enlazado mediante la fibra óptica 320 a múltiples sensores de carga ubicados de manera independiente.

En funcionamiento, la fuente lumínica 312 emite luz de banda ancha a la fibra óptica 320. Cada FBG 330 refleja un pico o banda estrecha de la luz de banda ancha. Además, cada pico reflejado de FBG puede centrarse en una característica de longitud de onda (representada en la figura 3 as $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) que se diferencia de las longitudes de onda características de las otras FBG 330 en la fibra óptica 320 para facilitar la identificación de qué reflexión corresponde a cada FBG. Las FBG 330 se montan en una superficie interior de la pala, que se estrecha y comprime durante el funcionamiento. Por tanto, las FBG 330 también experimentan el estrechado y compresión junto con la pala, lo que afecta a la respuesta de frecuencia de las FBG. Específicamente, la longitud de onda característica de las FBG cambiará en proporción a la flexión o compresión experimentada, proporcionando de este modo una medición del momento de flexión experimentado por la pala.

La interpretación de los cambios de longitud de onda característica a datos de momento de flexión se logra mediante el monitor de espectro 316, el conjunto de circuitos de control 318, y el convertor 319. Más específicamente, los picos de luz reflejada se reflejan de vuelta hacia el monitor de consulta 310. El elemento de circulación óptico 314 dirige la luz reflejada al monitor de espectro 316 y el monitor de espectro incluye un receptor de luz que convierte las reflexiones ópticas recibidas en señales eléctricas que portan datos de momento de flexión y que se alimentan al conjunto de circuitos de control 318. El conjunto de circuitos de control 318 detecta las frecuencias de los diferentes picos de luz reflejada y determina una cantidad mediante la cual las frecuencias cambian. Esta información se alimenta al convertor 319 para convertirse a datos de momento de flexión usando una relación matemática predeterminada. Sin embargo, si el sensor de carga 142 entra en un modo de falla, los datos de momento de flexión pueden dejar de ser fiables, lo que puede degradar las operaciones de control que dependen de los datos de momento de flexión, degradando de este modo el rendimiento del WTG 100 y provocando un riesgo de daño potencial.

La figura 4 muestra una gráfica de frecuencia frente a energía en la que se muestra una señal óptica nominal 410 reflejada por una FBG particular de las FBG 330 que no está experimentando un momento de flexión. Según lo que se comentó anteriormente con respecto a las FBG 330, la señal óptica nominal 410 tiene un pico que se centra en una longitud de onda característica que es única para la FBG 330 asociada. Puede exhibirse un modo de falla del sensor de carga 142 asociado mediante un cambio de energía y/o cambio de longitud de onda característica de la señal óptica nominal 410. Por ejemplo, la FBG 330 puede entrar en un modo de falla en el que produce una señal óptica defectuosa 420 que tiene menos energía y/o más frecuencia que la señal óptica nominal 410. Tales modos de falla pueden producirse debido a, por ejemplo, cambios de temperatura, errores de hardware y/o software, cortocircuitos, desgarrar y desgaste generales, etc. Además, aunque la señal óptica defectuosa 420 sufre cambios tanto en energía como en frecuencia, la señal óptica defectuosa 420 puede sufrir, en su lugar, solamente un cambio de energía o solamente un cambio de frecuencia. Además, un modo de falla puede exhibirse de otras maneras que incluyen, por ejemplo, un aumento de energía, una reducción de frecuencia, un ruido de señal excesivo, etc., en la señal óptica defectuosa 420.

Durante funcionamiento normal, el monitor de espectro 316 emite la señal óptica nominal 410 (y puede emitir otras señales ópticas similares correspondientes a otras FBG 330, si están presentes). Estos datos de salida se alimentan no solamente al conjunto de circuitos de control 318, sino también al detector de fallo de nivel bajo 220, que compara los datos de salida con datos de referencia que se espera que se emitan por el monitor de espectro 316. La comparación de los datos de salida con datos de referencia puede incluir comparar un nivel de energía de señal indicado por los datos de salida con un nivel de energía de señal indicado por los datos de referencia para producir un resultado de comparación de energía (por ejemplo, un valor que representa la cantidad de $\Delta_{\text{energía}}$ mostrada en la figura 4). Además, o alternativamente, la comparación de los datos de salida con datos de referencia puede incluir comparar una frecuencia de señal media indicada por los datos de salida con una frecuencia de señal media

indicada por los datos de referencia para producir un resultado de comparación de frecuencia media (por ejemplo, un valor que representa la cantidad de Δ_{frec} mostrada en la figura 4). Otra comprobación que puede realizarse por el detector de fallo de nivel bajo 220 es un recuento de picos para asegurarse de que se reciben un número esperado de picos. Por ejemplo, si se incluyen cinco FBG 330 en el sensor de carga según la prueba pero solamente se cuentan cuatro picos este resultado indicará un modo de falla. El recuento de picos, el resultado de comparación de energía y/o el resultado de comparación de frecuencia media puede proporcionarse como parte de la indicación de validez de nivel bajo.

Al realizar la(s) comparación/comparaciones anteriores, el detector de fallo de nivel bajo 220 puede detectar si el sensor de carga 142 ha entrado en un modo de falla. Por ejemplo, durante funcionamiento defectuoso, el monitor de espectro 316 puede emitir la señal óptica defectuosa 420, que, tal como se comentó anteriormente, se detectaría como una señal defectuosa mediante las operaciones de comparación estadística realizadas por el detector de fallo de nivel bajo 220. El detector de fallo de nivel bajo 220 puede entonces emitir una indicación de validez de nivel bajo negativa al controlador de WTG 230 como un aviso para que el controlador de WTG 230 ignore o reduzca la dependencia del sensor de carga defectuoso y/o para realizar una acción correctiva. Además, o alternativamente, la indicación de validez de nivel bajo negativa puede enviarse al conjunto de circuitos de control 318 como un aviso para que el conjunto de circuitos de control 318 ignore la salida de sensor y/o realice una acción correctiva. Además, la indicación de validez de nivel bajo negativa puede incluir información sobre qué FBG particular(es) es/son defectuoso(s) o si se encuentra que sean defectuosos solamente uno o un número seleccionado de FBG.

Algunos modos de falla pueden no detectarse por el detector de fallo de nivel bajo 220 o pueden no detectarse de manera puntual. Por tanto, el sistema 200 también puede incluir un detector de fallo de nivel alto 240. El detector de fallo de nivel alto 240 puede alimentarse de los mismos datos de salida que cada detector de fallo de nivel bajo 240 pero puede comparar los datos de salida con otros datos para producir un segundo resultado de comparación (es decir, una indicación de validez de nivel alto). La indicación de validez de nivel alto puede proporcionarse en forma de una tabla de verdad, valores clasificados, o alguna combinación de los mismos, tal como se comentó anteriormente con respecto a la indicación de validez de nivel bajo. Además, los otros datos evaluados por el detector de fallo de nivel alto 240 pueden recibirse de (o derivarse a partir de datos recibidos de) otros sensores, que incluyen sensores que están configurados para usarse en la medición de características del WTG distintas de un momento de flexión de pala, tal como una medición de velocidad de generador, una medición de energía de generador, una medición de par de generador, una medición de aceleración de góndola, una medición de aceleración de torre, una medición de aceleración de pala, una medición de ubicación de WTG, una medición de ángulo de cabeceo de pala, una medición de ángulo de ataque de cabeceo de pala, una medición de velocidad de rotor, y/o una medición de temperatura interna. Además, o alternativamente, los otros datos pueden recibirse de (o derivarse de datos recibidos de) sensores que están configurados para usarse en la medición de características del entorno en el que funciona el WTG, tales como una medición de velocidad de viento, una medición de dirección de viento, una medición de fuerza de empuje de viento, una medición de densidad de aire, y/o una medición de temperatura ambiental. La recepción de datos procedentes de otros sensores facilita la detección y diagnóstico de modos de falla en los sensores de carga 142 que pueden no detectarse fácilmente por el detector de fallo de nivel bajo 220, incluyendo cambios de frecuencia a largo plazo de una FBG 330. Además, o alternativamente, el detector de fallo de nivel alto 240 puede comparar la salida de datos procedente de un primer sensor de los sensores de carga 142 con la salida de datos procedente de un segundo sensor de los sensores de carga 142. El detector de fallo de nivel alto 240 también puede alimentarse del momento de flexión o datos de deformación producidos por el conversor 319 del sensor de carga 142 para verificar el funcionamiento correcto del conversor 319.

La salida de datos procedente de cada sensor de carga 142 puede verse afectada por el ángulo de azimut de la pala correspondiente debido a, por ejemplo, los efectos de sombra de torre en las cargas. Por tanto, como parte de la comparación de una salida de datos procedente de un primer sensor de carga 142 con una salida de datos procedente de un segundo sensor de carga 142, el detector de fallo de nivel alto 240 puede desviar temporalmente uno o ambos conjuntos de datos para alinear los ángulos de azimut de cada conjunto de datos. Para facilitar tal desvío temporal, el detector de fallo de nivel alto 240 puede recibir mediciones realizadas por un sensor de ángulo de azimut o puede derivar el ángulo de azimut a partir de datos de sensor de carga. Una comparación de este tipo puede no solamente pensar la diferencia en el ángulo de azimut sino también la velocidad de rotor y/o la intensidad de turbulencia.

Además, cuando se compara una salida de datos mediante diferentes tipos de sensores el detector de fallo de nivel alto 240 puede referirse a una relación predeterminada que relaciona los dos conjuntos de datos. Por ejemplo, los datos emitidos por un sensor de velocidad de viento no pueden compararse directamente con datos emitidos por los sensores de carga 142. Por tanto, uno o ambos conjuntos de datos pueden procesarse según una relación predeterminada que puede estar derivada empíricamente y/o a partir de leyes físicas conocidas que relacionan los conjuntos de datos como parte de la operación de comparación. Además, el procesado puede depender de datos adicionales procedentes de otros sensores y/o parámetros conocidos. Por ejemplo, una estimación de la velocidad de viento esperada puede derivarse de los datos de sensor de carga usando una relación predeterminada y la velocidad de viento estimada puede compararse con la velocidad de viento medida por un sensor para determinar si el sensor de carga que produce los datos de sensor de carga es defectuoso. Pueden realizarse otras operaciones de detección de nivel alto a modo de ejemplo usando uno o más generadores residuales creados basándose en

5 modelos de operaciones de WTG que dependen al menos parcialmente de o que afectan a las salidas de los sensores de carga 142 según determinadas relaciones físicas conocidas (derivadas empíricamente y/o a partir de leyes físicas). Los residuos producidos por generadores residuales son señales definidas para tener una media de cero y una desviación típica conocida. Por tanto, puede detectarse un modo de falla cuando la media de un residuo se desvía significativamente de cero o la desviación típica del residuo se desvía significativamente de la desviación típica conocida. La cantidad de desviación puede medirse mediante una prueba estadística, tal como una prueba de cociente de verosimilitud generalizado o una prueba de sumas acumuladas, que facilitan la afinación de verosimilitud de falsas alarmas y/o detecciones perdidas.

10 Los detectores de fallo de nivel alto y nivel bajo 220, 240 pueden realizar una detección de falla automáticamente en intervalos regulares o irregulares y/o en respuesta a una orden de un controlador, tal como el controlador de WTG 230. Además, los detectores de fallo de nivel alto y nivel bajo 220, 240 pueden implementarse usando un conjunto de circuitos que incluye hardware, software codificados en medios legibles por ordenador que incluyen medios programables y no programables, o cualquier combinación de lo anterior. Cuando un modo de falla se detecta o por el detector de fallo de nivel alto o de nivel bajo 220, 240, el detector puede enviar una indicación del modo de falla detectado al controlador de WTG 230 o al conjunto de circuitos de control 318. El controlador de WTG 230 o el conjunto de circuitos de control 318 pueden entonces compensar el modo de falla detectado. La compensación puede incluir, por ejemplo, ignorar la salida del sensor de carga defectuoso. Alternativamente, el conjunto de circuitos de control 318 puede controlar la fuente lumínica 312 para incrementar la energía basándose en el valor de energía declarado por el detector de fallo de nivel bajo 220 y/o puede procesar la salida del monitor de espectro 316 basándose en el valor de frecuencia declarado por el detector de fallo de nivel bajo 220.

15 Los sistemas anteriores pueden usarse para implementar diversos métodos de detección de modo de falla diferentes. La figura 5 muestra un diagrama de flujo que representa un método a modo de ejemplo 500 de detección de un modo de falla en un sensor, tal como uno de los sensores de carga 142. El método puede llevarse a cabo mediante el sistema 200 en las figuras 2 y 3. En la etapa 510, un primer sensor, tal como uno de los sensores de carga 142, se hace funcionar para generar un primer conjunto de datos (es decir, un primer conjunto de uno o más puntos de datos) que representan un momento de flexión experimentado por una pala de un WTG. En las etapas 520 y 530, se realiza una detección de modo de falla a un nivel bajo comparando el primer conjunto de datos con un conjunto de datos de referencia para producir uno o más resultados de comparación. Más específicamente, en la etapa 520 un nivel de energía de señal indicado por el primer conjunto de datos se compara con un nivel de energía de señal indicado por el conjunto de datos de referencia para producir un resultado de comparación de energía y en la etapa 530 una frecuencia de señal media indicada por el primer conjunto de datos se compara con una frecuencia de señal media indicada por el conjunto de datos de referencia para producir un resultado de comparación de frecuencia media. El detector de fallo de nivel bajo 220 puede realizar las etapas de comparación 520 y 530 anteriores.

25 Aunque se representa la realización de ambas etapas de comparación 520 y 530, en un método alternativo solamente se realiza una única de las etapas 520 y 530. Además de o en lugar de realizar una o ambas etapas de comparación 520 y 530, pueden realizarse etapas de comparación adicionales para comparar otros aspectos del primer conjunto de datos con aspectos correspondientes del conjunto de datos de referencia.

30 Además de realizar una detección de modo de falla de nivel bajo, el método 500 incluye las etapas 540 y 550 que pertenecen a la detección de modo de falla de nivel alto. Las etapas de detección de modo de falla de nivel alto pueden realizarse en paralelo (tal como se muestra) o en serie con las etapas de detección de modo de falla de nivel bajo 520 y 530 anteriores.

35 Las etapas de detección de modo de falla de nivel alto incluyen las etapas 540 y 550. En la etapa 540, se hace funcionar un segundo sensor para generar un segundo conjunto de datos. El segundo conjunto de datos puede representar un momento de flexión experimentado por otra pala del WTG. Alternativamente, el segundo conjunto de datos puede representar un momento de flexión experimentado por otro componente distinto de pala del WTG o puede representar otras características del WTG o de su entorno de funcionamiento, tal como la velocidad de viento, la dirección de viento, velocidad del generador, par de generador, o similares. En la etapa 550, el primer conjunto de datos se compara con el segundo conjunto de datos para producir un resultado de comparación de nivel alto. El detector de fallo de nivel alto 240 puede realizar esta operación de comparación. Como parte de la comparación, pueden procesarse uno o ambos conjuntos de datos, si fuera necesario. Por ejemplo, puede generarse una estimación del segundo conjunto de datos basándose en el primer conjunto de datos (o viceversa) para una comparación significativa con el segundo conjunto de datos. Este procesado de datos también puede realizarse mediante el detector de fallo de nivel alto 240.

40 En la etapa 560 se realiza una determinación con respecto a si el primer sensor ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en uno o más de los resultados de comparación. Esta determinación puede realizarse o bien por el detector de fallo de nivel bajo 220 o bien por el detector de fallo de nivel alto 240. Es posible que tanto el detector de fallo de nivel bajo 220 como el detector de fallo de nivel alto realicen la determinación de que el primer sensor ha entrado en un modo de falla. Por ejemplo, el detector de fallo de nivel bajo 220 puede realizar una determinación de si el primer sensor ha entrado en un modo de falla basándose en los resultados de comparación de nivel bajo (resultados de comparación de frecuencia media y energía) y el detector de fallo de nivel alto 240

puede realizar una determinación similar basándose en el resultado de comparación de nivel alto. Estas determinaciones pueden basarse en múltiples comparaciones de conjuntos de datos realizadas en momentos diferentes tanto en el nivel bajo como en el nivel alto. Además, en el nivel alto la determinación puede realizarse basándose en diversos conjuntos de datos diferentes procedentes de diferentes sensores del mismo tipo o de tipos diferentes.

En la etapa 570, una indicación del modo de falla detectado se envía a un controlador del primer sensor, tal como el controlador de WTG 230 y/o el conjunto de circuitos de control 318, y se realiza la compensación en el controlador de sensor para el modo de falla detectado. La indicación de modo de falla puede enviarse o bien por el detector de fallo de nivel bajo 220 o bien el detector de fallo de nivel alto 240. Además, si el primer sensor es el sensor de carga 142 y el modo de falla se detecta en el nivel bajo, la compensación puede incluir la modificación de salida de energía mediante la fuente lumínica 312 basándose al menos en parte en el resultado de comparación de energía y/o la compensación de un desvío de frecuencia basándose al menos en parte en el resultado de comparación de frecuencia media. La compensación del modo de falla detectado también puede incluir la inhabilitación del primer sensor y/o la reducción o eliminación de la dependencia de cualquier operación de control de accionador con respecto a la salida del primer sensor.

El método 500 se proporciona a modo de ejemplo, no como limitación, y puede modificarse de diversas maneras, lo que incluye la omisión y/o repetición de determinadas etapas, así como la adición de otras etapas. Por ejemplo, en una realización alternativa del método 500, el detector de fallo de nivel bajo no envía una indicación del fallo detectado a un controlador de sensor en la etapa 570 y en su lugar controla el primer sensor para compensar el modo de falla. Además, en otras realizaciones alternativas del método 500, o bien las etapas de detección de modo de falla de nivel bajo (etapas 520 y 530) o las etapas de detección de modo de falla de nivel alto (etapas 540 y 550) se omiten y solamente se realiza una única detección de modo de falla de nivel (alto o bajo). Además, la etapa 570 puede omitirse en algunas realizaciones si, por ejemplo, el controlador de sensor no tiene manera de compensar el modo de falla detectado o si tal compensación no es práctica. Por tanto, la determinación de si el primer sensor ha entrado en un modo de falla puede simplemente señalarse para que un técnico realice el mantenimiento (por ejemplo, mediante la inspección, reparación, y/o sustitución) del sensor defectuoso de manera inmediata o durante una operación de mantenimiento prevista. Además, el método 500 puede adaptarse para usarse con sensores de carga usados en estructuras distintas de WTG y/o con tipos de sensores distintos de sensores de carga.

Además, el método 500 o partes del mismo pueden repetirse según sea necesario. Por ejemplo, si el resultado de comparación de nivel alto indica un modo de falla y el resultado de comparación de nivel bajo no está disponible o es incierto puede no ser evidente si el primer sensor o el segundo sensor es defectuoso. Por tanto, las etapas 540 y 550 pueden repetirse una o más veces adicionales usando conjuntos de datos adicionales procedentes del mismo sensor o de otros sensores (si están disponibles) para ayudar a la determinación de si el primer sensor o segundo sensor es defectuoso. Además, pueden añadirse etapas adicionales que no se muestran al método 500. Por ejemplo, puede incluirse una etapa para contar varios picos recibidos por el sensor de carga 142 para detectar un modo de falla en el que varios picos que se reciben no corresponden a varios FBG en el sensor de carga 142.

Métodos y sistemas a modo de ejemplo descritos en el presente documento pueden usarse para detectar modos de falla de un sensor. El sensor en una realización a modo de ejemplo es un sensor de momento de flexión usado en una pala de un WTG. Los métodos y sistemas a modo de ejemplo incluyen detección de falla a un nivel bajo y/o a un nivel alto. En el nivel bajo, la salida del sensor se compara con datos de referencia y en el nivel alto la salida del sensor se compara con la salida de otros sensores, que pueden incluir otros tipos de sensores que miden otros tipos de datos.

Debe enfatizarse que las realizaciones descritas anteriormente son ejemplos posibles de implementaciones que se exponen simplemente por motivos de una clara comprensión de los principios de la invención. El experto en la técnica puede realizar muchas variaciones y modificaciones a la(s) realización/realizaciones descritas anteriormente, dichas variaciones y modificaciones están destinadas a incluirse en el presente documento dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Método (500) para detectar modos de falla de un primer sensor (142) de una pala de generador de turbina eólica (WTG), que detecta un momento de flexión de pala, comprendiendo el método:
 - 5 comparar (520, 530) una salida de datos por el primer sensor (142) con datos de referencia que indican lo que pretende emitirse mediante el primer sensor (142) para producir un primer resultado de comparación;
 - 10 comparar (550) una salida de datos por el primer sensor (142) con una salida de datos por un segundo sensor para producir un segundo resultado de comparación, en el que dicho segundo sensor detecta uno de: un momento de flexión experimentado por una segunda pala (140) del WTG (100), una velocidad de rotación de un generador del WTG (100), una aceleración de una góndola (120) del WTG, una aceleración de la primera pala (140) del WTG (100), una fuerza de empuje de viento en el WTG (100), una velocidad de rotación de un rotor del WTG (100), y un ángulo de cabeceo de al menos una de las palas (140) del WTG (100), o uno de: una velocidad de viento, una dirección de viento, una densidad de aire que rodea el WTG, y una temperatura de aire que rodea el WTG; y
 - 15 determinar (560) si el primer sensor (142) ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en los resultados de comparación primero y segundo.
2. Método (500) según la reivindicación 1, que comprende además:
 - enviar (570) una indicación del modo de falla detectado a un controlador (230) que realiza operaciones de control en función de la salida de datos por el primer sensor (142).
3. Método (500) según la reivindicación 1, que comprende además:
 - 20 enviar (570) una indicación del modo de falla detectado a un controlador (230, 318) del primer sensor (142); y
 - compensar (570), en el controlador de sensor (230, 318), el modo de falla detectado.
4. Método (500) según cualquier reivindicación anterior, en el que el primer sensor (142) incluye:
 - 25 una red de bragg de fibra (FBG) (330) configurada para colocarse en una superficie de la pala (140); y
 - un conjunto de circuitos de sensor (310) configurado para acoplarse ópticamente a la FBG (330) mediante una fibra óptica (320), incluyendo el conjunto de circuitos de sensor (310):
 - una fuente lumínica (312) configurada para emitir una señal lumínica; y
 - 30 un receptor de luz (316) configurado para recibir una reflexión de la señal lumínica desde la FBG (330) y para convertir la señal lumínica reflejada en los datos generados por sensor, en el que la comparación de los datos generados por el primer sensor con los datos de referencia para producir un resultado de comparación incluye comparar (520) un nivel de energía de señal indicado por los datos generados por el primer sensor con un nivel de energía de señal indicado por los datos de referencia para producir un resultado de comparación de energía.
5. Método (500) según la reivindicación 4, en el que el método incluye además:
 - 35 modificar (570) la salida de energía mediante la fuente lumínica en respuesta a la determinación de que el primer sensor ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en el resultado de comparación de energía.
6. Método (500) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el primer sensor (142) incluye:
 - 40 una red de bragg de fibra (FBG) (330) configurada para colocarse en una superficie de la pala (140); y
 - un conjunto de circuitos de sensor (310) configurado para acoplarse ópticamente a la FBG (330) mediante una fibra óptica (320), incluyendo el conjunto de circuitos de sensor (310):
 - una fuente lumínica (312) configurada para emitir una señal lumínica; y
 - 45 un receptor de luz (316) configurado para recibir una reflexión de la señal lumínica desde la FBG (330) y para convertir la señal lumínica reflejada en los datos generados por sensor,
 - en el que la comparación de los datos generados por sensor con los datos de referencia para producir un resultado de comparación incluye comparar (530) una frecuencia de señal media indicada por los datos generados por sensor con una frecuencia de señal media indicada por los datos de referencia para producir un resultado de comparación de frecuencia media.

7. Método (500) según la reivindicación 6, en el que el método incluye además:
compensar (570) un desvío de frecuencia del sensor en respuesta a la determinación de que el sensor (142) ha entrado en un modo de falla basándose al menos en parte en el resultado de comparación de frecuencia media.
- 5 8. Método (500) según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el primer sensor (142) incluye:
una red de bragg de fibra (FBG) (330) configurada para colocarse en una superficie de la pala (140);
un conjunto de circuitos de sensor (310) configurado para acoplarse ópticamente a la FBG (330) mediante una fibra óptica (320), incluyendo el conjunto de circuitos de sensor (310):
una fuente lumínica (312) configurada para emitir una señal lumínica; y
10 un receptor de luz (316) configurado para recibir una reflexión de la señal lumínica desde la FBG (330) y para convertir la señal lumínica reflejada en los datos que representan el momento de flexión experimentado por la pala (140).
9. Aparato para detectar modos de falla en un primer sensor (142) proporcionado en una pala de generador de turbina eólica (WTG) que detecta un momento de flexión de pala, comprendiendo el aparato:
15 un conjunto de circuitos de detección de falla de nivel bajo (220) configurado para comparar una salida de datos por el primer sensor (142) con datos de referencia para detectar un modo de falla del primer sensor (142);
y un conjunto de circuitos de detección de falla de nivel alto (240) configurado para comparar una salida de datos por el primer sensor (142) con una salida de datos por un segundo sensor que detecta uno de: un
20 momento de flexión experimentado por una segunda pala (140) del WTG (100), una velocidad de rotación de un generador del WTG (100), una aceleración de una góndola (120) del WTG, una aceleración de la primera pala (140) del WTG (100), una fuerza de empuje de viento en el WTG (100), una velocidad de rotación de un rotor del WTG (100), y un ángulo de cabeceo de al menos una de las palas (140) del WTG (100), o uno de: una velocidad de viento, una dirección de viento, una densidad de aire que rodea el WTG,
25 y una temperatura de aire que rodea el WTG, con el fin de detectar un modo de falla del primer sensor (142).
10. Generador de turbina eólica (WTG) (100) que incluye el aparato de detección de modo de falla según la reivindicación 9.

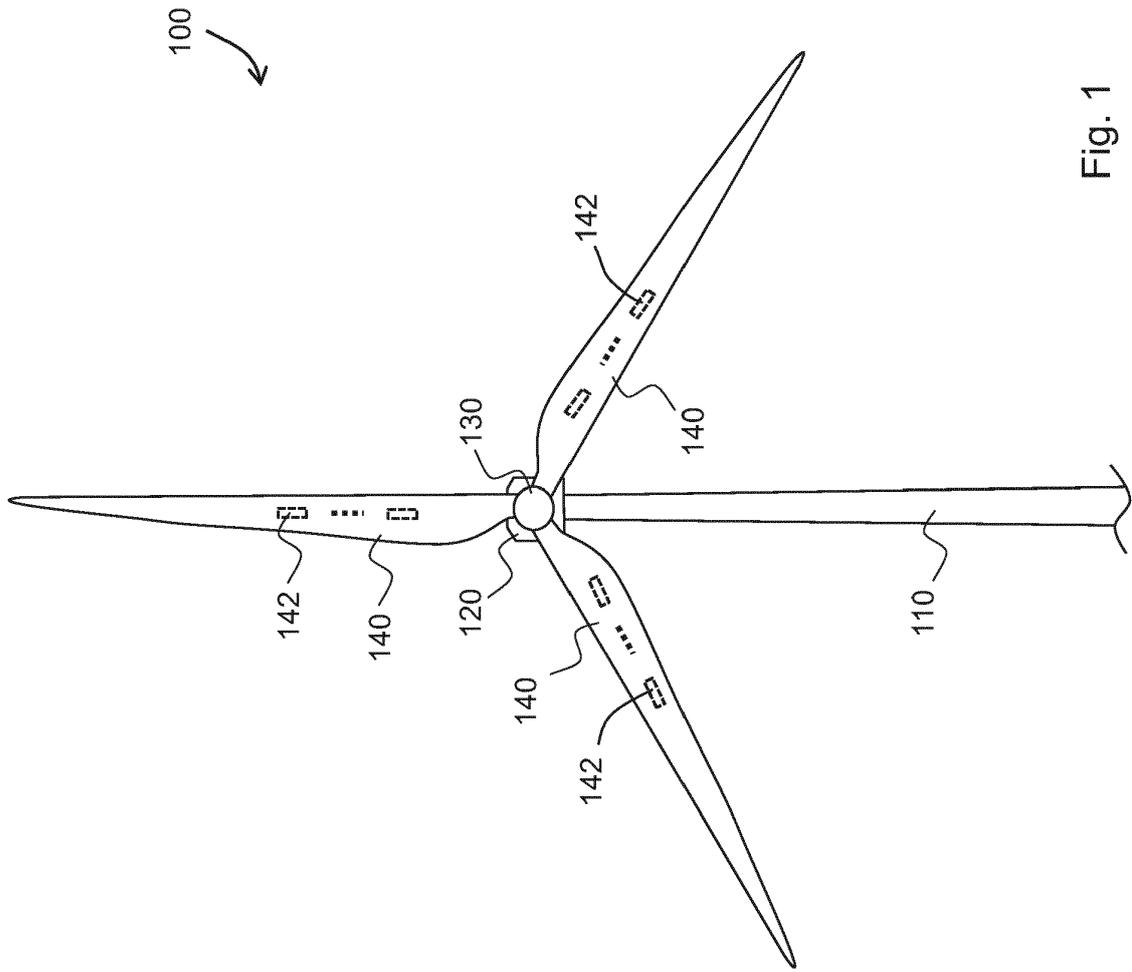


Fig. 1

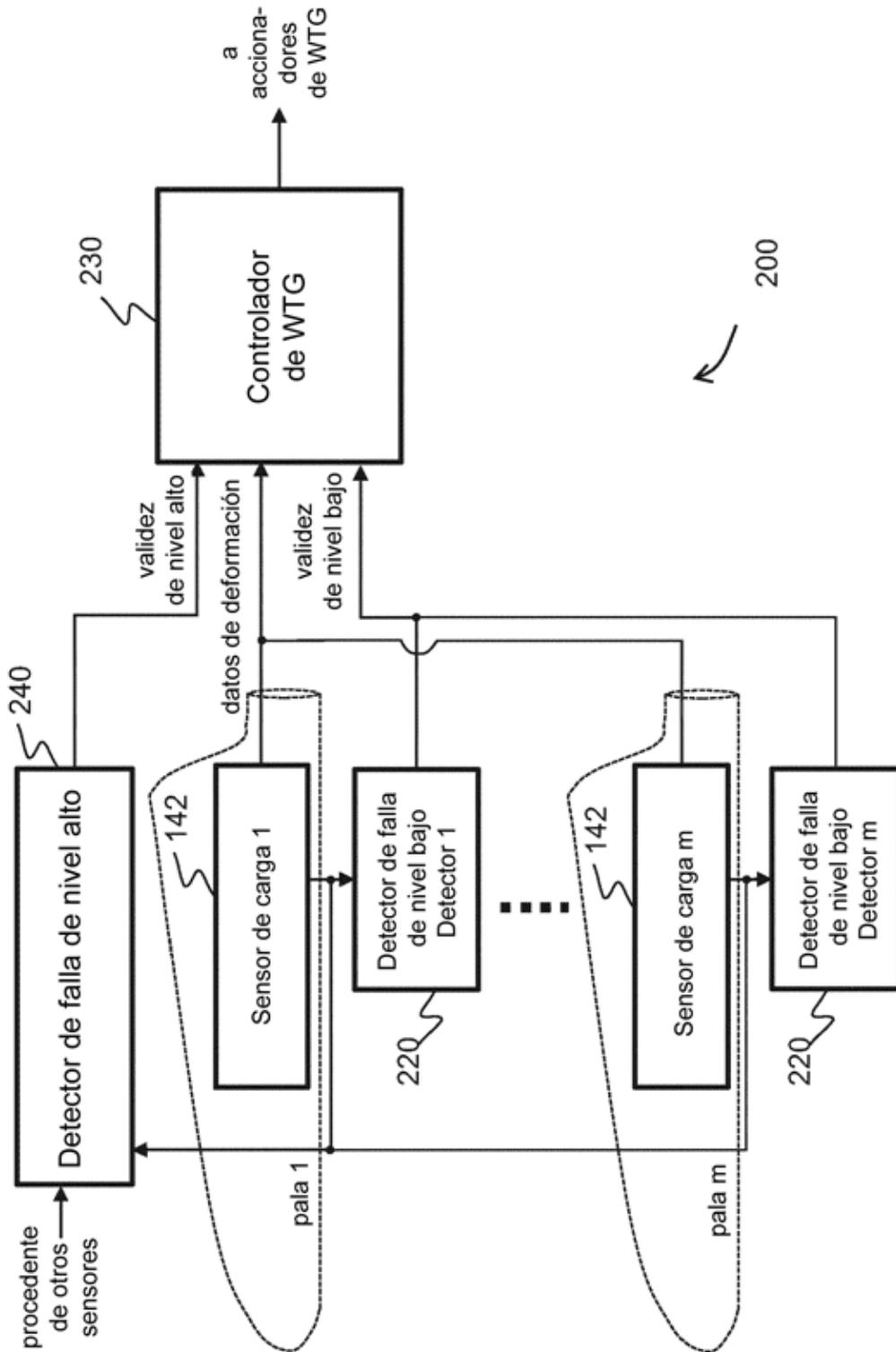


Fig. 2

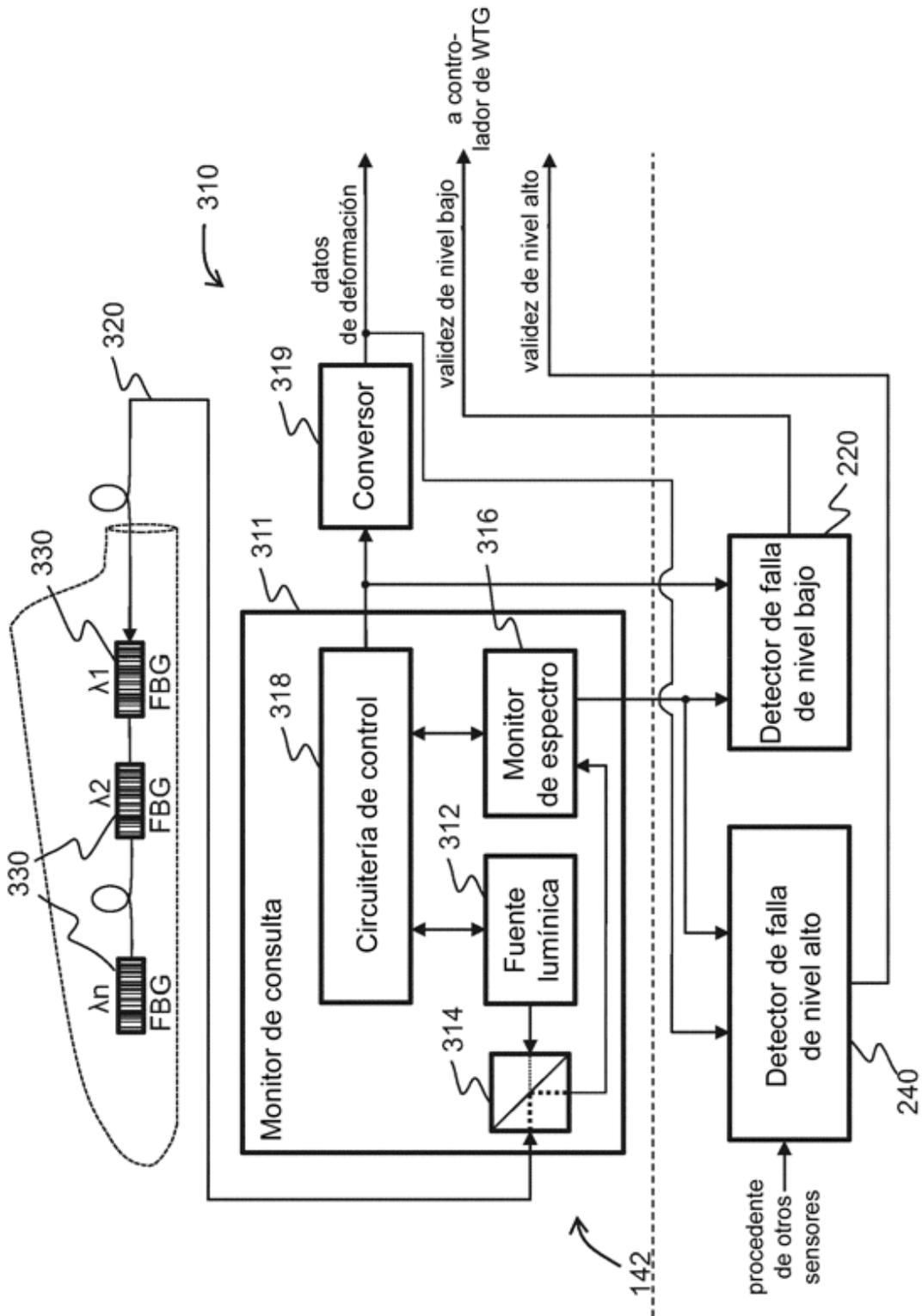


Fig. 3

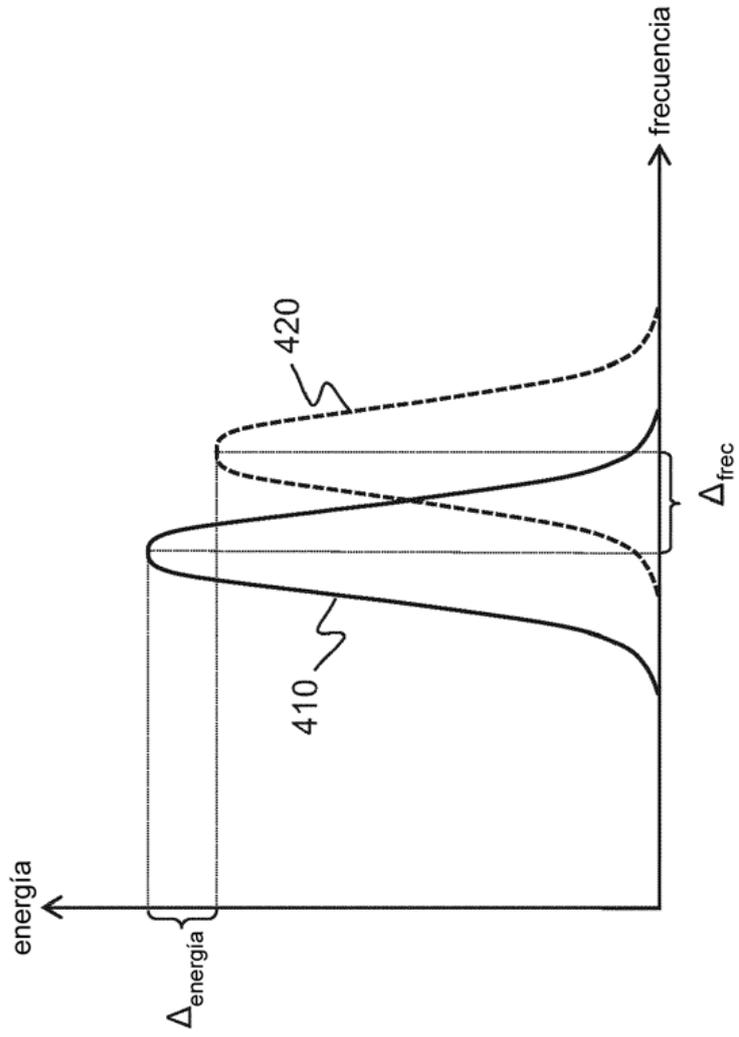


Fig. 4

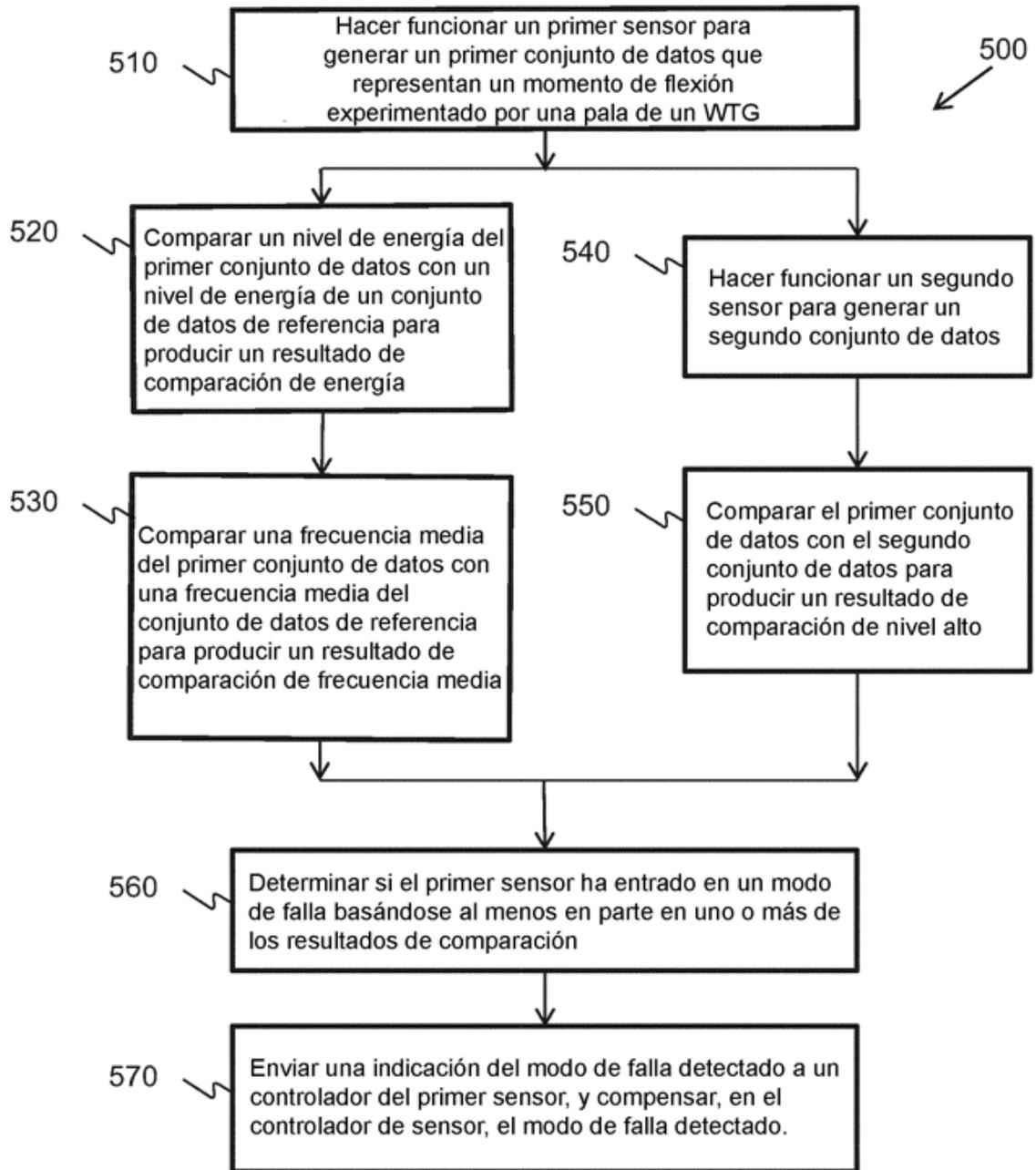


Fig. 5