

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 667 721**

51 Int. Cl.:

**F03D 17/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.02.2013 PCT/DK2013/050038**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.08.2014 WO14124643**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.02.2013 E 13707540 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.04.2018 EP 2956663**

54 Título: **Detección de anomalías estructurales de pala**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.05.2018**

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

72 Inventor/es:  
**EHSANI, SAED;  
MIRANDA, ERIK CARL LEHNSKOV;  
OLESEN, IB SVEND y  
SØRENSEN, MARTIN MØLLER**

74 Agente/Representante:  
**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 667 721 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**

Detección de anomalías estructurales de pala

**Antecedentes**

**Campo de la invención**

- 5 Realizaciones de la invención se refieren en general a anomalías de pala de turbina eólica y, más particularmente, a la determinación de cuándo se desvían características físicas de una pala de una caracterización predeterminada de la pala.

**Descripción de la técnica relacionada**

- 10 Las turbinas eólicas están situadas con frecuencia en zonas alejadas para aprovechar las condiciones meteorológicas imperantes en la zona. En estas zonas alejadas, las turbinas eólicas están expuestas con frecuencia a condiciones ambientales extremas. Estas condiciones ambientales extremas incluyen, pero no se limitan a, temperaturas extremas, lluvia, nieve, hielo, residuos portados por el aire y mar gruesa. Las condiciones ambientales, así como el envejecimiento, pueden provocar fallos estructurales en las palas de la turbina, por ejemplo agrietamiento, rotura de partes de la pala o deformación.
- 15 Para impedir el fallo catastrófico que impediría que funcionase la turbina (por ejemplo, que se desprenda la pala y dañe otras partes de la turbina eólica), puede usarse un sistema de detección de fallos. Si el sistema de detección identifica un fallo estructural, puede cambiarse el modo de funcionamiento de la turbina para impedir el fallo catastrófico. Por ejemplo, puede retirarse la turbina de la red de distribución hasta que se repare o sustituya una pala agrietada.
- 20 Un documento que muestra técnica relacionada es, por ejemplo, el documento US2009/0319199A1.

**Sumario**

- 25 Realizaciones de la presente divulgación incluyen un método, sistema y producto de programa informático para la detección de anomalías en una primera pala en una turbina eólica. El método, sistema y producto de programa informático incluyen proporcionar una caracterización predeterminada de la primera pala en los que la caracterización comprende al menos un valor de una característica física de la primera pala. El método, sistema y producto de programa informático incluyen derivar un valor actual de la característica física de la primera pala basándose en datos de sensor actualizados. Tras determinar, basándose en un primer umbral de error, que el valor actual de la característica física se desvía del valor en la caracterización predeterminada, el método, sistema y producto de programa informático comparan un primer valor medido asociado con la primera pala con un segundo
- 30 valor medido asociado con una segunda pala. Tras determinar, basándose en un segundo umbral de error, que el primer valor medido difiere del segundo valor medido, el método, sistema y producto de programa informático cambian el modo de funcionamiento de la turbina eólica.

**Breve descripción de los dibujos**

- 35 Para que pueda entenderse en detalle la manera en que se logran los aspectos citados anteriormente, puede disponerse de una descripción más particular de realizaciones de la invención, resumidas brevemente en lo anterior, mediante referencia a los dibujos adjuntos.
- Sn embargo, ha de indicarse que los dibujos adjuntos ilustran únicamente realizaciones típicas de esta invención y, por tanto, no han de considerarse limitativas de su alcance, ya que la invención puede aceptar otras realizaciones igualmente eficaces.
- 40 La figura 1 ilustra una vista esquemática de un aerogenerador, según una realización descrita en el presente documento.
- La figura 2 ilustra diversos sensores asociados con una pala de turbina, según una realización descrita en el presente documento.
- 45 La figura 3 ilustra un método de detección de anomalías de pala, según una realización descrita en el presente documento.
- La figura 4 ilustra un sistema para la detección de anomalías de pala, según una realización descrita en el presente documento.
- Las figuras 5A-5B ilustran la generación de una tabla de comparación para comparar palas de turbina, según las realizaciones descritas en el presente documento.
- 50 La figura 6 ilustra un método de detección de anomalías de pala que usa una combinación de técnicas de detección

de fallos, según una realización descrita en el presente documento.

Para facilitar la comprensión, se han usado números de referencia idénticos, cuando era posible, para designar elementos idénticos que son comunes para las figuras. Se contempla que elementos dados a conocer en una realización pueden utilizarse de manera beneficiosa en otras realizaciones sin que se mencione específicamente.

**5 Descripción detallada**

La detección de anomalías o defectos estructurales de pala, tales como agrietamiento, deformación, astillas, y similares, en una pala antes de que las anomalías den como resultado un fallo catastrófico que haga que la pala sea irreparable o provoque un daño a otras partes de la turbina eólica, puede tener ventajas económicas así como repercutir ventajosamente en la reputación. Tras la detección de un comportamiento anómalo, un sistema de control puede cambiar el modo de funcionamiento de la turbina (por ejemplo, desacoplar la turbina de la red de distribución o detener el rotor). Entonces puede enviarse un técnico a la turbina para evaluar y reparar la anomalía.

En una realización, un sistema de detección de fallos genera una “huella dactilar” para cada pala en una turbina. La huella dactilar puede ser una agrupación de características físicas, dinámicas de la pala tales como su masa, relación de deformación, relación de amortiguación, y similares. El sistema de detección de fallos puede generar una huella dactilar para cada pala basándose en una especificación de fabricante asociada con la pala, las características dinámicas medidas durante una fase de configuración, las características dinámicas medidas cuando está validándose la pala en una instalación de prueba, o cualquier combinación de estas técnicas. Mientras está funcionando la turbina (por ejemplo, generando energía en una red de distribución), el sistema de detección de fallos recibe información de sensor actualizada que se usa para derivar las características actuales de la pala. Si las características actuales se desvían de las características en la huella dactilar de la pala, el sistema identifica la pala como con comportamiento anómalo. En una realización, esta caracterización inicial de anomalía puede verificarse con una comparación adicional. Por ejemplo, para confirmar que la pala tiene en efecto un comportamiento anómalo (es decir, tiene un defecto estructural), el sistema de detección de fallos puede comparar las características de la pala que se desvía de la huella dactilar con características de otra pala en la turbina. La comparación de las palas entre sí reduce el riesgo de que una condición ambiental temporal provocase que las características físicas actuales de la pala se desviasen de su huella dactilar. Sin embargo, si las características actuales de la pala son diferentes de las características de la otra pala, el sistema de detección de fallos confirma que la pala tiene una anomalía y cambia el modo de funcionamiento de la turbina tal como desconectar la turbina de la red de distribución o detener el rotor.

La presente invención se explicará ahora en mayor detalle. Aunque la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, se han dado a conocer realizaciones específicas a modo de ejemplos. Sin embargo, debe entenderse que no se pretende que la invención se limite a las formas particulares dadas a conocer. Más bien, la invención va a cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que se encuentren dentro del espíritu y alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

**35 UN AEROGENERADOR A MODO DE EJEMPLO**

La figura 1 ilustra una vista esquemática de un aerogenerador de eje horizontal 100. El aerogenerador 100 incluye normalmente una torre 102 y una góndola de turbina eólica 104 ubicadas en la parte superior de la torre 102. Un rotor de turbina eólica 106 puede conectarse con la góndola 104 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende hacia fuera de la góndola 104. El rotor de turbina eólica 106 incluye tres palas de rotor 108 montadas en un buje común 110, pero puede incluir cualquier número adecuado de palas, tal como uno, dos, cuatro, cinco o más palas. La pala 108 (o perfil aerodinámico) tiene normalmente una forma aerodinámica con un borde de ataque 112 para estar cara al viento, un borde de salida 114 en el extremo opuesto de una cuerda para la pala 108, una punta 116 y una raíz 118 para la conexión al buje 110 de cualquier manera adecuada.

Para algunas realizaciones, las palas 108 pueden conectarse al buje 110 usando cojinetes de regulación de paso 120 de tal manera que cada pala 108 puede hacerse rotar alrededor de su eje longitudinal para ajustar el paso de la pala. El ángulo de paso de una pala 108 puede controlarse mediante accionadores lineales o motores paso a paso, por ejemplo, conectados entre el buje 110 y la pala 108.

La figura 2 ilustra diversos sensores asociados con una pala de turbina 200, según una realización descrita en el presente documento. La pala 200 incluye sensores de carga a lo largo del borde 205A y 205B que miden la carga generada por la pala 200 en el sentido de rotación en el plano del rotor y sensores de carga a lo largo del flap 210A y 210B que miden la carga generada por la pala 200 en la dirección perpendicular al plano del rotor. Los sensores a lo largo del borde y a lo largo del flap 205 y 210 pueden captar datos de carga a diferentes ángulos azimutales (es decir, un grado de rotación en el plano del rotor) para determinar características físicas de la pala 200 tales como su masa o relación de amortiguación. En una realización, los sensores 205 y 210 están ubicados en una superficie de contacto entre la pala 200 y el rotor de turbina eólica (no se muestra).

La pala 200 también incluye un sistema de sensor de deformación que incluye el cable de fibra óptica 215 y los sensores de deformación 220A-220C. Usando luz transportada por el cable de fibra óptica 215, los sensores de deformación 220A-220C miden una cantidad de deformación o deflexión, es decir, cuánto se curva o se deforma la

estructura de la pala 200, en la pala 200. De manera similar a las fuerzas medidas por los sensores de carga 205 y 210, los sensores de deformación 220A-220C pueden medir la deformación en la pala a diferentes ángulos azimutales para determinar una característica física de la pala 200, por ejemplo, la relación de deformación de la pala. En otra realización, pueden colocarse otros sensores que miden diferentes fuerzas en la pala 200 o en la turbina eólica para identificar características físicas de la pala. Además, la pala 200 puede incluir sensores de carga o deformación 205, 210, y 220 adicionales (o menos) que los representados en la figura 2.

#### DETECCIÓN DE ANOMALÍAS DE PALA

La figura 3 ilustra un método 300 de detección de anomalías de pala, según una realización descrita en el presente documento. En el bloque 305, un sistema de detección de fallos puede definir huellas dactilares de pala para cada pala en una turbina eólica. Las huellas dactilares pueden incluir una agrupación de diferentes características físicas de la turbina tales como la masa, relación de deformación, relación de amortiguación de la pala, y otras características físicas de segundo orden. En una realización, las características físicas son dinámicas y pueden cambiar durante el funcionamiento de turbina. Por ejemplo, si se cae una pieza de la pala, cambia la masa de la pala, o si fuertes vientos deforman una pala, puede cambiar su relación de deformación. En una realización, las características que componen la huella dactilar de la pala pueden derivarse de una especificación de fabricante. Por ejemplo, el fabricante puede indicar que se garantiza que una turbina tiene un determinado peso más/menos diez kilogramos. En otras realizaciones, las características pueden determinarse realizando pruebas en las palas o bien en una instalación de prueba o bien como parte de una fase de configuración de instalación de una turbina. Por ejemplo, las primeras cien rotaciones de una turbina (cuando la turbina no está conectada a la red de distribución) pueden usarse para recopilar datos de los sensores mostrados en la figura 2 para desarrollar las huellas dactilares para las palas. En una realización, el sistema de detección de fallos puede usar una combinación de la especificación de fabricante y los datos medidos para generar las huellas dactilares.

En el bloque 310, el sistema de detección de fallos puede recibir datos de sensor actualizados para una de las palas en la turbina. Los datos de sensor pueden incluir, por ejemplo, la deformación actual de la pala o los momentos a lo largo del borde y a lo largo del flap (N/m) de la pala. En una realización, el sistema de detección de fallos puede usar los datos de sensor para derivar características físicas actualizadas asociadas con la pala.

Por ejemplo, los momentos a lo largo del borde o a lo largo del flap pueden medirse cuando la pala está delante de la torre de turbina (un ángulo azimutal de 180 grados) y en la parte superior del plano del rotor (un ángulo azimutal de 0 grados). Correlacionando los datos medidos a los dos ángulos azimutales diferentes, el sistema de detección de fallos puede identificar la masa actual de la pala. En una realización, las características físicas pueden derivarse usando, por ejemplo, de cinco a diez rotaciones del rotor. Es decir, los datos de sensor pueden promediarse a través de múltiples rotaciones. El hacerlo así puede reducir los errores que pueden producirse cuando se miden los datos de sensor durante picos en las condiciones ambientales tales como una ráfaga de viento repentina. Por tanto, en una realización, la extracción de los datos de los sensores en la pala puede llevar varios minutos antes de que el sistema de detección de fallos use los datos de sensor para derivar las características físicas de la pala.

En el bloque 315, el sistema de detección de fallos compara las características físicas actuales derivadas de los datos de sensor actualizados con la huella dactilar de la pala. El sistema de detección de fallos puede estar configurado con uno o más umbrales predefinidos que representan cuando las características físicas actuales se desvían de las características incluidas dentro de la huella dactilar de la pala. Por ejemplo, si la relación de amortiguación actual varía más del 15% con respecto a la relación de amortiguación en la huella dactilar, el sistema de detección de fallos puede indicar que la pala tiene un comportamiento anómalo. En algunas realizaciones, el sistema de detección de fallos puede tener diferentes umbrales predefinidos para cada una de las características físicas en la huella dactilar.

El sistema de detección de fallos puede comparar cada característica física actual de pala con cada característica física en la huella dactilar. En una realización, siempre que una de las características físicas supere el umbral asociado, el sistema de detección de fallos determina que la pala tiene un comportamiento anómalo y avanza al bloque 320. Alternativamente, el sistema de detección de fallos puede requerir que una pluralidad de características actuales de la pala (por ejemplo, dos de tres) se desvíen de los valores almacenados en la huella dactilar antes de clasificar el comportamiento de la pala como anómalo. Sin embargo, si el sistema de detección de fallos determina que las características de pala actuales no se desvían de la huella dactilar, el método 300 vuelve al bloque 310 para recibir datos de sensor actualizados.

En el bloque 320, el sistema de detección de fallos usa los datos recopilados de las turbinas individuales para generar tablas de comparación para confirmar que una pala tiene en efecto un comportamiento anómalo. Para generar las tablas de comparación, el sistema de detección de fallos puede convertir los datos de sensor de basarse en el tiempo (por ejemplo, el momento a lo largo del borde medido en una pala en un tiempo específico) a basarse en el ángulo azimutal (por ejemplo, el momento a lo largo del borde medido cuando la pala está en una ubicación específica en el plano del rotor). El sistema de detección de fallos puede generar una tabla de comparación usando estos datos de sensor convertidos cuando la tabla de comparación incluye valores que representan las diferentes fuerzas, momentos o características físicas medidos en las palas de la turbina. Por ejemplo, la tabla de comparación puede incluir un valor de diferencia de momento a lo largo del borde que representa la diferencia entre el momento a

lo largo del borde medido en la pala A y el mismo momento medido en la pala B a ángulos azimutales específicos. La tabla de comparación también puede incluir otros valores de diferencia correspondientes a otros ángulos azimutales así como un historial de valores de diferencia anteriores. El sistema de detección de fallos puede estar configurado para o bien generar la tabla de comparación basándose en la comparación sólo de un subconjunto de las turbinas entre sí (por ejemplo, la pala A frente a la pala B) o bien generar la tabla de comparación basándose en la comparación de cada pala con cada segunda pala en la turbina (por ejemplo, la pala A frente a la pala B, la pala B frente a la pala C, y la pala C frente a la pala A en una turbina con tres palas).

Aunque se muestra que el bloque 320 tiene lugar después de determinar que las características de pala actuales se desvían de la huella dactilar negra, el bloque 320 puede tener lugar en paralelo al método 300. Es decir, la turbina puede actualizar de manera continua (o a un intervalo predeterminado) la tabla de comparación basándose en la recepción de datos de fuerza actualizados, por ejemplo, los momentos a lo largo del borde y a lo largo del flap. Por tanto, en una realización, la tabla de comparación puede haberse rellenado ya una vez que el sistema de detección de fallos determina que la característica de pala actual se desvía de la huella dactilar de la pala.

En el bloque 325, el sistema de detección de fallos compara una fuerza, un momento o una característica física de la pala identificada como con comportamiento anómalo en el bloque 315 con la fuerza, el momento o la característica física de al menos otra pala en la turbina usando la tabla de comparación. Por ejemplo, si la relación de amortiguación de la pala A disminuyó en el 20% en comparación con la relación de amortiguación en la huella dactilar de la pala A, la relación de amortiguación actual de la pala B también puede compararse con su huella dactilar de pala para determinar si su relación de amortiguación relativa también tuvo una disminución similar. Es decir, el sistema de detección de fallos puede almacenar en la tabla de comparación un valor de diferencia que representa la divergencia entre el cambio en la amortiguación de la pala A y la pala B. Alternativamente, la relación de amortiguación para ambas de la pala A y la pala B puede compararse directamente. Por ejemplo, si el valor de diferencia derivado de la comparación de la relación de amortiguación actual (o el cambio en la relación de amortiguación) de la pala A con la misma característica de la pala B indica que los valores de característica física respectivos están dentro del 10% entre sí, el sistema de detección de fallos determina que la pala A no tiene un comportamiento anómalo. En su lugar, la desviación con respecto a la huella dactilar de la pala detectada en el bloque 315 puede haber estado provocada por una condición ambiental tal como un aumento repentino de las velocidades del viento o una condición de helada que añade tensión a las palas.

El sistema de detección de fallos también puede comparar la característica física con otras palas además de la pala B (por ejemplo, comparar la pala A con la pala C) en la turbina eólica para determinar si la pala A tiene un comportamiento anómalo. Además, el sistema de detección de fallos puede estar configurado para confirmar que la pala A tiene un comportamiento anómalo si cualquiera de los momentos medidos en la pala A difiere de los momentos medidos en una de la pala B o la pala C. O bien, el sistema de detección de fallos puede confirmar que la pala A tiene un comportamiento anómalo sólo si los momentos medidos en la pala A difieren de los momentos medidos tanto en la pala B como en la pala C. En otra realización, en lugar de la comparación de las fuerzas de la pala identificada en el bloque 315 con otra pala en la misma turbina, el sistema de detección de fallos puede comparar la pala con una pala ubicada en una turbina diferente que puede estar en la misma planta o parque eólico.

Si ambos bloques 315 y 325 indican que una turbina particular tiene un comportamiento anómalo, en el bloque 330, el sistema de detección de fallos marca la pala que tiene un comportamiento anómalo. El marcado de la pala puede indicar a un sistema independiente en la turbina o SCADA que realice pruebas adicionales en la pala con comportamiento anómalo. Por ejemplo, marcar la pala puede dar como resultado la activación de un módulo de prueba independiente que confirma que la pala tiene una anomalía estructural en el bloque 333. En una realización, el módulo de prueba realiza una primera prueba mientras la pala está todavía conectada a la red. Por ejemplo, puede disminuirse la potencia nominal de la turbina mediante la prueba ejecutando una serie de cambios predefinidos o secuenciales en el ángulo de paso para la pala marcada y midiendo las características físicas de la pala. Si la prueba confirma que la pala se marcó de manera apropiada, es decir, la pala tiene un comportamiento anómalo, el módulo de prueba puede realizar pruebas adicionales después de cambiar el modo de funcionamiento de la turbina.

En el bloque 335, el sistema de detección de fallos cambia el modo de funcionamiento de la turbina al ralentí. En una realización, cambiar el modo de funcionamiento al ralentí desconecta la turbina de la red eléctrica. Sin embargo, en otra realización, el modo de funcionamiento puede cambiarse de tal manera que se disminuye la potencia nominal de la turbina, por ejemplo, produce 2 MW de potencia en vez de 3 MW. En este caso, la turbina puede permanecer conectada al sistema eléctrico pero disminuye la carga, permitiendo de ese modo que un módulo de prueba evalúe mejor la carga en las palas.

En el bloque 340, el módulo de prueba ubicado en la turbina o el SCADA puede ejecutar una segunda prueba en la pala después de haberse cambiado su modo de funcionamiento para confirmar el defecto estructural detectado en los bloques 315 y 325. En una realización, el segundo autodiagnóstico se ejecuta mientras la turbina está al ralentí, es decir, desconectada de la red de distribución.

Mientras está desconectada, puede aplicarse una referencia de paso sinusoidal a la pala marcada. Además, puede aplicarse una señal de ruido blanco en intervalos de frecuencia predefinidos especificados que están asociados

probablemente con el defecto estructural. O bien, puede excitarse el rotor añadiendo par del generador (por ejemplo, una excitación con ruido blanco o sinusoidal) para hacer que el daño estructural resulte más evidente para el módulo de prueba. Además, en una realización, el autodiagnóstico puede realizarse sólo en la pala o palas marcadas.

5 En el bloque 345, si el módulo de prueba confirma que la pala tiene un defecto estructural, el módulo de detección de fallos puede apagar la turbina y programar una visita de mantenimiento en el bloque 350. Por ejemplo, la turbina con la pala marcada puede estar en alta mar donde resulta costoso enviar personal de mantenimiento. Por tanto, puede usarse el autodiagnóstico adicional para confirmar que la pala marcada tiene en efecto un defecto estructural. Por tanto, para parques eólicos en los que la programación de tareas de mantenimiento es menos cara, pueden omitirse los bloques 340 y 345. Si el autodiagnóstico no indica que la pala marcada tiene un defecto estructural, en el bloque 355 puede quitarse la marca y el método 300 vuelve al bloque 310 para repetir la técnica de detección de fallos.

10 En una realización, el método 300 puede realizar pruebas adicionales en otros bloques en el diagrama de flujo. Por ejemplo, durante el funcionamiento (es decir, sin cambiar el modo de funcionamiento de la turbina), después del bloque 315, el sistema de detección de fallos puede realizar una prueba estructural en la pala cuyas características actuales se desvíen de su huella dactilar de pala.

15 La figura 4 ilustra un sistema 400 para la detección de anomalías de pala, según una realización descrita en el presente documento. El sistema 400 incluye al menos una turbina eólica 405 y un sistema de cálculo 430. La turbina eólica 405 puede ser cualquier tipo de central eólica con cualquier número de palas de turbina 410. Tal como se muestra, cada pala 410 incluye uno o más sensores de carga a lo largo del borde 205, sensores de carga a lo largo del flap 210 y sensor de deformación 220 que pueden estar ubicados en las posiciones mostradas en la figura 2. En otras realizaciones, la pala 410 puede incluir tipos adicionales de sensores de fuerza o sólo un subconjunto de los sensores mostrados. Además, el sistema 400 puede incluir una pluralidad de las turbinas eólicas dispuestas en una planta o parque eólico que se acoplan de manera comunicativa al sistema de cálculo 430 mediante enlaces de comunicación 470 respectivos. El enlace 470 representa cualquier canal de comunicación por cable o inalámbrico que permita que el sistema de cálculo 430 reciba datos de sensor de la turbina 405 así como transmita órdenes a la turbina 405 tal como una orden para cambiar el modo de funcionamiento de la turbina 405.

20 El sistema informático 430 incluye un procesador 435 y una memoria 440 y puede formar parte, en una realización, de un sistema de control y monitorización (SCADA) asociado con la turbina 405. El procesador 435 representa cualquier tipo de elemento de procesamiento que pueda realizar las funciones detalladas en el presente documento. Por ejemplo, el procesador 435 puede representar múltiples procesadores o procesadores multinúcleo. La memoria 440 puede implementarse mediante una memoria volátil o no volátil tal como memoria de acceso aleatorio (por ejemplo, DRAM o Flash) o caché. La memoria 440 también puede incluir elementos de almacenamiento tales como una unidad de disco duro, dispositivo de estado sólido (SSD), unidad de almacenamiento de memoria flash, o incluso elementos de memoria externos al sistema de cálculo 430.

25 La memoria 440 incluye un sistema de detección de fallos 445 que puede ser una aplicación que se ejecuta por el sistema de cálculo 430. Sin embargo, en una realización, el sistema de detección de fallos 445 puede incluir componentes de hardware o ser una combinación de hardware y software. El sistema de detección de fallos 445 incluye dos módulos: el módulo de desviación de pala 450 y el módulo de comparación de pala 460. El módulo de desviación de pala 450 puede realizar la función descrita en el bloque 315 en el que se comparan las características actuales de una pala con la huella dactilar de la pala 455. Por consiguiente, el módulo de desviación de pala 450 puede incluir múltiples huellas dactilares 455 que corresponden cada una a palas 410 respectivas en la turbina eólica 405. En una realización, el módulo de desviación de pala 450 usa los datos de sensor procedentes de la turbina eólica 405 para calcular las características físicas actuales de una de las palas (por ejemplo, masa, relación de amortiguación, relación de esfuerzo de la pala, y similares) y compara los valores calculados con los almacenados en la huella dactilar 455. Si la diferencia entre los valores supera uno o más umbrales predefinidos de error, el sistema de detección de fallos 445 puede ejecutar el módulo de comparación de pala 460 para confirmar que la pala 410 tiene un comportamiento anómalo. En una realización, el módulo de desviación de pala 450 también puede estar configurado para generar la huella dactilar 455 basándose en una especificación de fabricante o una fase de configuración tal como se comentó en lo anterior. Alternativamente, un sistema de cálculo o aplicación independiente no mostrado en el sistema 400 puede encargarse de generar la huella dactilar 455 que se transmite luego al sistema de detección de fallos 445.

30 En una realización, el módulo de desviación de pala 450 puede recopilar de manera constante datos de sensor procedentes de la turbina eólica 405 y determinar si cada pala 410 se ha desviado de su huella dactilar 455 respectiva. Alternativamente, el módulo de desviación de pala 450 puede ejecutarse únicamente a determinados intervalos o el módulo 450 puede someter a prueba cada pala 410 secuencialmente, por ejemplo, de manera cíclica una a una. Además, el módulo de desviación 450 puede recopilar datos medidos al mismo ángulo azimutal para una pluralidad de rotaciones. Por ejemplo, el módulo 450 puede registrar el momento a lo largo del borde en la pala A cada vez que la pala 410 alcanza los 180 grados en el plano de rotación. El módulo de desviación 450 puede derivar una o más de las características físicas basándose en un promedio de la pluralidad de valores de momento a lo largo del borde medidos. El uso de múltiples rotaciones representa el compromiso entre evitar falsos positivos (por ejemplo, si la característica física se deriva durante una ráfaga de viento repentina) y el tiempo requerido para

extraer los datos de la turbina. Por consiguiente, puede ajustarse la cantidad de datos extraídos antes de derivar las características físicas según se desee.

5 Puede llamarse al módulo de comparación de pala 460 una vez que el módulo de desviación de pala 450 determina que una pala se desvía de su huella dactilar 455. Dicho de otra manera, el módulo de comparación de pala 460  
 10 puede usarse para confirmar que la pala tiene un comportamiento anómalo. Tal como se muestra, el módulo de comparación de pala 460 calcula una o más tablas de comparación 465. En una realización, los datos de sensor transmitidos por la turbina eólica 405 también puede recibirlos el módulo de comparación de pala 460. Basándose en estos valores de sensor, el módulo de comparación de pala 460 genera la tabla de comparación 465 que contiene valores que reflejan una diferencia entre fuerzas, momentos o características físicas asociados con las palas 410 respectivas. Dado que pueden medirse los datos de sensor basándose en el tiempo, no pueden correlacionarse los datos de sensor procedentes de diferentes turbinas. Es decir, el momento a lo largo del borde para la pala A medido en un tiempo específico puede no ser comparable al momento a lo largo del borde para la pala B en ese mismo tiempo puesto que la pala A puede estar a 180 grados en el plano del rotor mientras que la pala B puede estar a 60 grados o 300 grados (suponiendo una turbina con tres palas convencional). Por tanto, el  
 15 módulo de comparación de pala 460 puede convertir los datos de sensor recibidos de que varíen basándose en el tiempo a que varíen basándose en el ángulo azimutal. Aunque las realizaciones proporcionadas en el presente documento describen la conversión de los datos de sensor del dominio de tiempo a un dominio dependiente del ángulo azimutal, los datos de sensor pueden convertirse en otras cantidades tales como ángulo de paso, velocidad del viento, velocidad de rotación, potencia producida, aceleración de la torre, o combinaciones de los mismos. Este  
 20 procedimiento de conversión se comentará en mayor detalle a continuación.

El módulo de comparación de pala 460 compara los datos de sensor convertidos de la pluralidad de palas para generar uno o más valores de diferencia que se almacenan en la tabla de comparación 465. Por ejemplo, la tabla de comparación 465 puede incluir una lista de valores que identifican una diferencia entre el momento a lo largo del flap ejercido sobre la pala A y el momento a lo largo del flap ejercido sobre la pala B a un ángulo azimutal particular a lo largo de un determinado número de ciclos de rotor, por ejemplo, las últimas 100 rotaciones. Además, la  
 25 tabla 465 puede incluir un listado independiente para ángulos azimutales independientes, por ejemplo, valores de diferencia cuando las turbinas estén a 0 grados y cuando las turbinas estén a 180 grados en el plano del rotor. Usando la tabla de comparación 465, una lógica de confirmación en el módulo de comparación de pala 460 determina si el valor de diferencia supera un umbral de error. Por ejemplo, la lógica de confirmación puede evaluar un promedio de la pluralidad de valores de diferencia (medidos en las últimas 100 rotaciones) para determinar si el valor promedio supera el umbral de error. En caso afirmativo, el módulo de comparación de pala 460 puede confirmar que la pala 410 tiene en efecto un comportamiento anómalo. En respuesta, el sistema de detección de fallos 445 puede enviar una señal de control a la turbina eólica 405 para cambiar el modo de funcionamiento de la turbina 405.

35 En una realización, el módulo de comparación de pala 460 puede actualizar la tabla de comparación 465 al mismo tiempo que el módulo de desviación de pala 450 determina si la pala 410 se desvía de su huella dactilar 455. Es decir, cada vez que la turbina eólica 405 transmite datos de sensor actualizados al sistema de cálculo 430, el módulo de comparación de pala 460 actualiza la tabla de comparación 465 sin esperar a ver si el módulo de desviación de pala 450 ha identificado una posible pala con comportamiento anómalo. Por tanto, la actualización de la tabla de comparación 465 puede ser un proceso previo al cálculo que se realiza en paralelo a (o de manera concurrente a) el  
 40 módulo de desviación de pala 450. De esta manera, una vez que el módulo de desviación de pala 450 sí que identifica una posible pala con comportamiento anómalo, el módulo de comparación de pala 460 puede instanciar la lógica de comparación para determinar si la pala con comportamiento anómalo difiere de las demás palas en la turbina sin tener que generar o actualizar las tablas de comparación 465.

45 Las figuras 5A-5B ilustran la generación de una tabla de comparación 465 para comparar palas de turbina, según las realizaciones descritas en el presente documento. Específicamente, la figura 5A ilustra un sistema 500 que incluye un sensor de azimut 505, uno o más sensores de carga de pala 510 y sensores de deformación 515. El sensor de azimut 505 puede estar ubicado en una turbina eólica y proporciona el ángulo azimutal actual ( $\Phi$ ) de las palas A, B y C en la turbina (es decir,  $\Phi_{ABC}$ ). Por ejemplo, el sensor de azimut 505 puede transmitir el ángulo actual para las palas A, B y C al sistema de detección de fallos a intervalos de un segundo. En el mismo intervalo, los sensores de carga de pala 510 (por ejemplo, los sensores a lo largo del borde y a lo largo del flap mostrados en la figura 2) pueden transmitir valores actualizados de momento a lo largo del borde ( $M^e$ ) y a lo largo del flap ( $M^f$ ) asociados con las palas A, B y C al sistema de detección de fallos. Además, los sensores de deformación pueden transmitir un esfuerzo o deflexión actual (D) en cada pala en el mismo intervalo.

55 Después de pasar a través del filtro de ruido 520, el módulo de comparación de pala 460 puede convertir los valores de momento y deformación basados en el tiempo en los valores de momento y deformación basados en el azimut. La figura 5B es un ejemplo de esta conversión. El lado izquierdo de la figura 5B ilustra los diferentes momentos a lo largo del borde asociados con las tres palas de turbina,  $M^e_A$ ,  $M^e_B$  y  $M^e_C$ , basándose en un tiempo en el que se miden los momentos. Dado que las tres palas están a ángulos azimutales diferentes a diferente tiempo (en este caso, el desfase es de 120 grados) los momentos a lo largo del borde en cualquier tiempo particular varían drásticamente. Sin embargo, el módulo de comparación de pala puede usar el sensor de azimut para desplazar, en un sentido, los  
 60 datos de sensor para eliminar la dependencia del tiempo. Usando tanto una memoria intermedia para almacenar los

datos de sensor y la señal procedente del sensor de azimut 505, el módulo de comparación de pala 460 convierte las señales basadas en el tiempo en señales basadas en el azimut tal como se muestra en el lado derecho de la figura 5B. En general, la comparación de las palas basándose en una ubicación particular en el plano del rotor (es decir, ángulo azimutal) produce resultados más exactos que la comparación de las palas basándose en un tiempo particular. El hacerlo así, sin embargo, puede introducir nuevas inexactitudes en la comparación, por ejemplo, si se produce una ráfaga de viento corta y repentina que afecta a una turbina a un ángulo azimutal particular, pero si la ráfaga de viento amaina para cuando las demás turbinas eólicas alcanzan el mismo ángulo azimutal, la comparación de pala puede ser inexacta. Sin embargo, estos tipos de errores pueden atenuarse, promediando los valores de de múltiples rotaciones al mismo ángulo azimutal. Además, el módulo de comparación de pala 460 puede usar una velocidad del viento actual para mejorar la exactitud de la conversión. Por ejemplo, si la velocidad del viento difiere sustancialmente entre mediciones, los datos pueden ignorarse, es decir, no convertirse de un dominio a otro.

El módulo de comparación de pala 460 puede usar los datos de sensor convertidos y la velocidad del viento actual para generar la tabla de comparación 465. Tal como se mencionó previamente, los valores de diferencia almacenados en la tabla de comparación 465 pueden representar la diferencia entre los momentos o las características físicas de las turbinas respectivas a un ángulo azimutal particular. Por ejemplo,  $\Delta_{AB}(\Phi)$  es la diferencia entre los momentos a lo largo del borde y a lo largo del flap, así como la deflexión, de la pala A y la pala B:

$$|M_A^e - M_B^e| \text{ y } |M_A^f - M_B^f| \text{ y } |D_A - D_B| \alpha \cdot \phi = c \quad (1)$$

El módulo 460 puede realizar una lógica similar para generar los valores de diferencia entre todas las palas en la turbina, es decir,  $\Delta_{BC}(\Phi)$  y  $\Phi_{AC}(\Phi)$ . Además, en vez de comparar momentos tal como se muestra en la figuras 5A-B, el módulo 460 puede derivar en primer lugar las características físicas (por ejemplo, masa) y generar valores de diferencia basándose en las características físicas. La lógica de confirmación 525 puede consultar la tabla de comparación 465 para recuperar un valor de diferencia que la lógica 525 compara entonces con un umbral de error respectivo para determinar si el momento asociado con una pala es sustancialmente diferente del momento asociado con otra pala.

Si la lógica de confirmación 525 determina que un momento o características de una pala se desvían sustancialmente del momento o característica de otra pala, la lógica 525 puede marcar la pala que indica que debe realizarse una lógica de autodiagnóstico de pala 530 sometiendo a prueba adicionalmente la pala marcada o bien antes de que se cambie el modo de funcionamiento de la turbina (es decir, el autodiagnóstico mostrado en el bloque 333 de la figura 3) o bien después de que se cambie el modo al ralentí (es decir, el autodiagnóstico mostrado en el bloque 340 de la figura 3). La lógica de autodiagnóstico de pala 530 puede ser hardware, software, o una combinación de ambos que está ubicada, por ejemplo, en la turbina o parte de un sistema SCADA asociado con la turbina.

La figura 6 ilustra un método 600 de detección de anomalías de pala que usa una combinación de técnicas de detección de fallos, según una realización descrita en el presente documento. La figura 6 difiere de método 300 mostrado en la figura 3 en que el método 600 incluye el bloque 605. Específicamente, en el bloque 605, puede usarse un sistema de detección de fallos independiente para indicar si una pala tiene un comportamiento anómalo. Dado que realizar las pruebas representadas en los bloques 315 y 325 puede llevar periodos de tiempo sustanciales (por ejemplo, el tiempo necesario para que las palas roten 5-10 ciclos), el sistema de detección de fallos incluye una técnica de detección secundaria, independiente que puede devolver resultados de forma más rápida que las demás técnicas en el método 600. Por ejemplo, la técnica de detección secundaria realiza una verificación de continuidad óptica o genera una estimación del peso o la masa de la pala. Por ejemplo, la pala puede incluir un sistema de verificación de continuidad óptica en el que al menos se enrolla una fibra óptica alrededor de la pala. Siempre que la luz transmitida en un extremo de la fibra alcanza el otro extremo de la fibra, la pala pasa la prueba. Sin embargo, si se desprende una parte de la pala, cortando de ese modo la fibra óptica, la luz no llegará al extremo de la fibra indicando que la pala tiene un fallo estructural.

En otra realización, técnica secundaria de fallos puede usar los mismos sensores de datos usados en los bloques 315 y 325 para identificar un comportamiento anómalo. Por ejemplo, pueden usarse sensores de carga para medir el momento de la pala a 0 grados y 180 grados en el plano del rotor. Para estos valores, el sistema de detección de fallos puede derivar una estimación de la masa de las palas basándose en una única rotación de la pala. Aunque la masa estimada puede ser inexacta si, por ejemplo, las mediciones de carga se realizan durante una ráfaga de viento extrema, el umbral de error que se compara con la masa estimada puede ser lo suficientemente grande como para que los efectos de las condiciones ambientales sean irrelevantes. Por ejemplo, el umbral de error puede requerir una pérdida de masa del 10% antes de que se marque la pala como con comportamiento anómalo pero las condiciones ambientales pueden provocar como máximo que la estimación se aleje en el 5%. Por tanto, el bloque 605 indicará que la pala tiene un comportamiento anómalo sólo si se ha desprendido alguna parte de la pala. De esta manera, la técnica secundaria de fallos añadida al método 600 puede ser menos exacta que las demás técnicas pero puede identificar fallos importantes en un periodo de tiempo más corto.

Si la técnica secundaria de fallos identifica una pala que tiene un comportamiento anómalo, el método 600 avanza directamente al bloque 335 en el que se cambia el modo de funcionamiento de la turbina, por ejemplo, se pone al

ralentí o se disminuye la potencia nominal la turbina. En una realización, el sistema de detección de fallos puede responder de manera diferente dependiendo de si la técnica secundaria del bloque 605 en vez de la técnica primaria de los bloques 315 y 325 determina que una pala tiene un comportamiento anómalo. Si la técnica primaria determina que una pala tiene un comportamiento anómalo, el sistema de detección de fallos puede desconectar la pala de la red eléctrica pero permitir que el rotor continúe rotando. Si la técnica secundaria identifica el comportamiento anómalo, el sistema de detección de fallos puede detener el rotor inmediatamente. La parte restante del método 600 puede ser igual a como se describió previamente en la figura 3.

En el comentario anterior, se hace referencia a realizaciones de la invención. Sin embargo, debe entenderse que la invención no se limita a las realizaciones específicas descritas. Más bien, se contempla cualquier combinación de las siguientes características y elementos, ya estén relacionados con diferentes realizaciones o no, para implementar y poner en práctica la invención. Además, aunque realizaciones de la invención pueden lograr ventajas con respecto a otras posibles soluciones y/o con respecto a la técnica anterior, el que se logre o no una ventaja particular mediante una realización dada no limita la invención. Por tanto, los siguientes aspectos, características, realizaciones y ventajas son meramente ilustrativos y no se consideran elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se citan de manera explícita en una(s) reivindicación/reivindicaciones. Asimismo, la referencia a "la invención" no debe interpretarse como una generalización de ningún contenido inventivo dado a conocer en el presente documento y no se considerará que es un elemento o una limitación de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se cite de manera explícita en una(s) reivindicación/reivindicaciones.

Tal como apreciará un experto en la técnica, pueden realizarse aspectos de la presente invención como un sistema, método o producto de programa informático. Por consiguiente, aspectos de la presente invención pueden adoptar la forma de una realización completamente de hardware, una realización completamente de software (incluyendo firmware, software residente, microcódigo, etc.) o una realización que combina aspectos de software y hardware que puede denominarse en su totalidad generalmente en el presente documento "módulo" o "sistema." Además, aspectos de la presente invención pueden adoptar la forma de un producto de programa informático incorporado en uno o más medio(s) legible(s) por ordenador que tiene(n) código de programa legible por ordenador incorporado en el mismo/los mismos.

Puede usarse cualquier combinación de uno o más medio(s) legible(s) por ordenador. El medio legible por ordenador puede ser un medio de señal legible por ordenador o un medio de almacenamiento legible por ordenador. Un medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser, por ejemplo, pero sin limitarse a, un sistema, aparato o dispositivo electrónico, magnético, óptico, electromagnético, de infrarrojo o semiconductor, o cualquier combinación adecuada de los anteriores. Ejemplos más específicos (una lista no exhaustiva) del medio de almacenamiento legible por ordenador incluirán los siguientes: una conexión eléctrica que tiene uno o más cables, un disquete de ordenador portátil, un disco duro, una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de sólo lectura (ROM), una memoria de sólo lectura borrable (EPROM o memoria Flash), una fibra óptica, una memoria de sólo lectura de disco compacto portátil (CD-ROM), un dispositivo de almacenamiento óptico, un dispositivo de almacenamiento magnético, o cualquier combinación adecuada de los anteriores. En el contexto de este documento, un medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser cualquier medio tangible que puede contener o almacenar un programa para su uso por o en relación con un sistema, aparato o dispositivo de ejecución de instrucciones.

Un medio de señal legible por ordenador puede incluir una señal de datos propagada con código de programa legible por ordenador incorporado en la misma, por ejemplo, en la banda base o como parte de una onda portadora. Una señal propagada de este tipo puede adoptar cualquiera de una variedad de formas, incluyendo, pero sin limitarse a, electromagnética, óptica, o cualquier combinación adecuada de las mismas. Un medio de señal legible por ordenador puede ser cualquier medio legible por ordenador que no sea un medio de almacenamiento legible por ordenador y que pueda comunicar, propagar o transportar un programa para su uso por o en relación con un sistema, aparato o dispositivo de ejecución de instrucciones.

Puede transmitirse código de programa incorporado en un medio legible por ordenador usando cualquier medio apropiado, incluyendo pero sin limitarse a inalámbrico, línea por cable, cable de fibra óptica, RF, etc., o cualquier combinación adecuada de los anteriores.

Puede escribirse código de programa informático para llevar a cabo operaciones para aspectos de la presente invención en cualquier combinación de uno o más lenguajes de programación, incluyendo un lenguaje de programación orientado a objetos tal como Java, Smalltalk, C++ o similar y lenguajes de programación de procedimiento convencionales, tales como el lenguaje de programación "C" o lenguajes de programación similares. El código de programa puede ejecutarse completamente en el ordenador del usuario, parcialmente en el ordenador del usuario, como paquete de software autónomo, parcialmente en el ordenador del usuario y parcialmente en un ordenador o servidor remoto. En esta última situación, el ordenador remoto puede conectarse al ordenador del usuario a través de cualquier tipo de red, incluyendo una red de área local (LAN) o una red de área amplia (WAN), o puede realizarse la conexión a un ordenador externo (por ejemplo, a través de Internet usando un proveedor de servicios de Internet).

A continuación se describen aspectos de la presente invención con referencia a las ilustraciones de diagrama de

- flujo y/o diagramas de bloques de métodos, aparatos (sistemas) y productos de programa informático según realizaciones de la invención. Se entenderá que cada bloque de las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, y combinaciones de bloques en las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, puede implementarse mediante instrucciones de programa informático. Estas instrucciones de programa informático pueden proporcionarse a un procesador de un ordenador de uso general, ordenador para aplicaciones especiales, u otro aparato de procesamiento de datos programable para producir una máquina, de tal modo que las instrucciones, que se ejecutan por el procesador del ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable, crean medios para implementar las funciones/acciones especificadas en el bloque o bloques de diagrama de flujo y/o diagrama de bloques.
- Estas instrucciones de programa informático también pueden almacenarse en un medio legible por ordenador que puede ordenar a un ordenador, otro aparato de procesamiento de datos programable u otros dispositivos que funcionen de una manera particular, de tal modo que las instrucciones almacenadas en el medio legible por ordenador producen un artículo de fabricación que incluye instrucciones que implementan la función/acción especificada en el bloque o bloques de diagrama de flujo y/o diagrama de bloques.
- Las instrucciones de programa informático también pueden cargarse en un ordenador, otro aparato de procesamiento de datos programable u otros dispositivos para hacer que se realicen una serie de etapas operativas en el ordenador, otro aparato programable u otros dispositivos para producir un procedimiento implementado por ordenador de tal modo que las instrucciones que se ejecutan en el ordenador u otro aparato programable proporcionan procedimientos para implementar las funciones/acciones especificadas en el bloque o bloques de diagrama de flujo y/o diagrama de bloques.

### Conclusión

La detección de anomalías o defectos estructurales de pala, tales como agrietamiento, deformación, astillas, y similares, en una pala antes de que las anomalías den como resultado un fallo catastrófico que haga que la pala sea irreparable o provoque un daño a otras partes de la turbina eólica puede tener ventajas económicas así como repercutir ventajosamente en la reputación. Tras la detección de un comportamiento anómalo, un sistema de control puede cambiar el modo de funcionamiento de la turbina (por ejemplo, desacoplar la turbina de la red de distribución o detener el rotor). Entonces puede enviarse un técnico a una turbina para evaluar y reparar la anomalía.

En una realización, un sistema de detección de fallos genera una huella dactilar para cada pala en una turbina. La huella dactilar puede ser una agrupación de características físicas, dinámicas de la pala tales como su masa, relación de deformación, relación de amortiguación, y similares. El sistema de detección de fallos puede generar una huella dactilar para cada pala basándose en una especificación de fabricante asociada con la pala, las características dinámicas medidas durante una fase de configuración, las características dinámicas medidas cuando está validándose la pala en una instalación de prueba, o cualquier combinación de estas técnicas. Mientras está funcionando la turbina (por ejemplo, generando energía en una red de distribución), el sistema de detección de fallos recibe información de sensor actualizada que se usa para derivar las características actuales de la pala. Si las características actuales se desvían de las características en la huella dactilar de la pala, el sistema identifica la pala como con comportamiento anómalo. Para confirmar que la pala tiene en efecto un comportamiento anómalo (es decir, tiene un defecto estructural), el sistema de detección de fallos puede comparar las características de la pala que se desvían de la huella dactilar con características de otra pala en la turbina. La comparación de las palas entre sí reduce el riesgo de que una condición ambiental temporal provoque que las características físicas actuales de la pala se desvíen de su huella dactilar. Sin embargo, si las características actuales de la pala son diferentes de las características de la otra pala, el sistema de detección de fallos confirma que la pala tiene una anomalía y cambia el modo de funcionamiento de la turbina tal como desconectar la turbina de la red de distribución o detener el rotor.

El diagrama de flujo y los diagramas de bloques en las figuras ilustran la arquitectura, funcionalidad y funcionamiento de posibles implementaciones de sistemas, métodos y productos de programa informático según diversas realizaciones de la presente invención. A este respecto, cada bloque en el diagrama de flujo o los diagramas de bloques puede representar un módulo, segmento o parte de código, que comprende una o más instrucciones ejecutables para implementar la(s) función/funciones lógica(s) especificada(s). También debe indicarse que, en algunas implementaciones alternativas, las funciones indicadas en el bloque pueden llevarse a cabo en un orden distinto al indicado en las figuras. Por ejemplo, dos bloques mostrados sucesivamente pueden ejecutarse, de hecho, de manera sustancialmente concurrente, o los bloques pueden ejecutarse a veces en el orden inverso, dependiendo de la funcionalidad implicada. También se indicará que cada bloque de la ilustración de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, y combinaciones de bloques en la ilustración de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques, puede implementarse mediante sistemas basados en hardware para aplicaciones especiales que realicen las funciones o acciones especificadas, o combinaciones de hardware para aplicaciones especiales e instrucciones informáticas.

Aunque lo anterior se refiere a realizaciones de la presente invención, pueden concebirse otras realizaciones y realizaciones adicionales de la invención sin apartarse del alcance básico de la misma, y el alcance de la misma está determinado por las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Método de detección de anomalías en una primera pala en una turbina eólica, que comprende:  
proporcionar una caracterización predeterminada de la primera pala, comprendiendo la caracterización al menos un valor de una característica física de la primera pala;
- 5 5 derivar un valor actual de la característica física de la primera pala basándose en datos de sensor actualizados;  
tras determinar, basándose en un primer umbral de error, que el valor actual de la característica física se desvía del valor en la caracterización predeterminada, comparar un primer valor medido asociado con la primera pala con un segundo valor medido asociado con una segunda pala; y
- 10 tras determinar, basándose en un segundo umbral de error, que el primer valor medido difiere del segundo valor medido, cambiar el modo de funcionamiento de la turbina eólica.
2. Método según la reivindicación 1, en el que las palas primera y segunda están ubicadas en la misma turbina eólica, que comprende además:  
15 comparar el primer valor medido de la primera pala con un tercer valor medido asociado con una tercera pala en la turbina eólica, en el que sólo se realiza el cambio del modo de funcionamiento de la turbina eólica si el primer valor medido difiere de ambos valores medidos segundo y tercero basándose en umbrales de error respectivos.
3. Método según la reivindicación 1, en el que se convierten los datos de sensor usados para generar los valores medidos primero y segundo de depender del tiempo a depender de una característica física de la turbina eólica, en el que comparar el primer valor medido con el segundo valor medido comprende:  
20 evaluar un valor de diferencia almacenado en una tabla de comparación, en el que el valor de diferencia se genera comparando el primer valor medido con el segundo valor medido a un valor particular de la característica física.
4. Método según la reivindicación 1, en el que el primer valor medido y el segundo valor medido se basan en al menos una de una fuerza medida en la turbina eólica y una característica física de las palas primera y segunda derivada de datos de sensor actualizados.
- 25 5. Método según la reivindicación 1, en el que la caracterización predeterminada se genera basándose en al menos uno de una especificación de fabricante asociada con la primera pala y datos de sensor extraídos durante una fase de configuración de la turbina eólica.
- 30 6. Método según la reivindicación 1, que comprende además:  
antes de cambiar el modo de funcionamiento de la turbina, realizar un primer autodiagnóstico en la primera pala;  
después de cambiar el modo de funcionamiento de la turbina, realizar un segundo autodiagnóstico en la primera pala, en el que cambiar el modo de funcionamiento de la turbina eólica comprende al menos uno de:  
35 de: desconectar la turbina eólica de una red de distribución y detener la rotación de un rotor de la turbina eólica; y  
tras determinar que los autodiagnósticos primero y segundo confirman que la primera pala tiene un comportamiento anómalo, informar a un sistema de mantenimiento de que la primera pala tiene un comportamiento anómalo.
- 40 7. Método según la reivindicación 1, que comprende además, determinar, basándose en una técnica de detección secundaria, si los datos de sensor actualizados satisfacen un tercer umbral de error, en el que la técnica de detección secundaria requiere menos tiempo para ejecutarse que determinar si el valor actual de la característica física se desvía del valor en la caracterización predeterminada.
8. Sistema, que comprende:  
45 un procesador informático; y  
una memoria que contiene un programa que, cuando se ejecuta en el procesador informático, realiza una operación para la detección de anomalías en una primera pala en una turbina eólica, que comprende:  
proporcionar una caracterización predeterminada de la primera pala, comprendiendo la caracterización al menos un valor de una característica física de la primera pala;

- 5 derivar un valor actual de la característica física de la primera pala basándose en datos de sensor actualizados;
- 5 tras determinar, basándose en un primer umbral de error, que el valor actual de la característica física se desvía del valor en la caracterización predeterminada, comparar un primer valor medido asociado con la primera pala con un segundo valor medido asociado con una segunda pala; y
- 5 tras determinar, basándose en un segundo umbral de error, que el primer valor medido difiere del segundo valor medido, cambiar el modo de funcionamiento de la turbina eólica.
9. Sistema según la reivindicación 8, en el que las palas primera y segunda están ubicadas en la misma turbina eólica, comprendiendo además la operación:
- 10 comparar el primer valor medido de la primera pala con un tercer valor medido asociado con una tercera pala en la turbina eólica, en el que sólo se realiza el cambio del modo de funcionamiento de la turbina eólica si el primer valor medido difiere de ambos valores medidos segundo y tercero basándose en umbrales de error respectivos.
10. Sistema según la reivindicación 8, en el que se convierten los datos de sensor usados para generar los valores medidos primero y segundo de depender del tiempo a depender de una característica física de la turbina eólica, en el que comparar el primer valor medido con el segundo valor medido comprende:
- 15 evaluar un valor de diferencia almacenado en una tabla de comparación, en el que el valor de diferencia se genera comparando el primer valor medido con el segundo valor medido a un valor particular de la característica física.
- 20 11. Sistema según la reivindicación 8, en el que el primer valor medido y el segundo valor medido se basan en al menos una de una fuerza medida en la turbina eólica o una característica física de las palas primera y segunda derivada de datos de sensor actualizados.
12. Sistema según la reivindicación 8, en el que la caracterización predeterminada se genera basándose en al menos uno de una especificación de fabricante asociada con la primera pala y datos de sensor extraídos durante una fase de configuración de la turbina eólica.
- 25 13. Sistema según la reivindicación 8, en el que cambiar el modo de funcionamiento de la turbina eólica comprende al menos uno de: desconectar la turbina eólica de una red de distribución y detener la rotación de un rotor de la turbina eólica.
14. Sistema según la reivindicación 8, comprendiendo además la operación, determinar, basándose en una técnica de detección secundaria, si los datos de sensor actualizados satisfacen un tercer umbral de error, en el que la técnica de detección secundaria requiere menos tiempo para ejecutarse que determinar si el valor actual de la característica física se desvía del valor en la caracterización predeterminada.
- 30 15. Producto de programa informático para la detección de anomalías en una primera pala en una turbina eólica, comprendiendo el producto de programa informático:
- 35 un medio de almacenamiento legible por ordenador que tiene código de programa legible por ordenador incorporado en el mismo, el código de programa legible por ordenador comprendiendo código de programa legible por ordenador configurado para:
- 40 proporcionar una caracterización predeterminada de la primera pala, comprendiendo la caracterización al menos un valor de una característica física de la primera pala;
- 40 derivar un valor actual de la característica física de la primera pala basándose en datos de sensor actualizados;
- 40 tras determinar, basándose en un primer umbral de error, que el valor actual de la característica física se desvía del valor en la caracterización predeterminada, comparar un primer valor medido asociado con la primera pala con un segundo valor medido asociado con una segunda pala; y
- 45 tras determinar, basándose en un segundo umbral de error, que el primer valor medido difiere del segundo valor medido, cambiar el modo de funcionamiento de la turbina eólica.
16. Producto de programa informático según la reivindicación 15, en el que las palas primera y segunda están ubicadas en la misma turbina eólica, que comprende además código de programa legible por ordenador configurado para:
- 50 comparar el primer valor medido de la primera pala con un tercer valor medido asociado con una tercera pala en la turbina eólica, en el que sólo se realiza el cambio del modo de funcionamiento de la turbina eólica

si el primer valor medido difiere de ambos valores medidos segundo y tercero basándose en umbrales de error respectivos.

- 5 17. Producto de programa informático según la reivindicación 15, en el que se convierten los datos de sensor usados para generar los valores medidos primero y segundo de depender del tiempo a depender de una característica física de la turbina eólica, en el que comparar el primer valor medido con el segundo valor medido comprende:
- evaluar un valor de diferencia almacenado en una tabla de comparación, en el que el valor de diferencia se genera comparando el primer valor medido con el segundo valor medido a un valor particular de la característica física.
- 10 18. Producto de programa informático según la reivindicación 15, en el que el primer valor medido y el segundo valor medido se basan en al menos una de una fuerza medida en la turbina eólica o una característica física de las palas primera y segunda derivada de datos de sensor actualizados.
- 15 19. Producto de programa informático según la reivindicación 15, en el que la caracterización predeterminada se genera basándose en al menos uno de una especificación de fabricante asociada con la primera pala y datos de sensor extraídos durante una fase de configuración de la turbina eólica.
20. Producto de programa informático según la reivindicación 15, en el que cambiar el modo de funcionamiento de la turbina eólica comprende al menos uno de: desconectar la turbina eólica de una red de distribución y detener la rotación de un rotor de la turbina eólica.

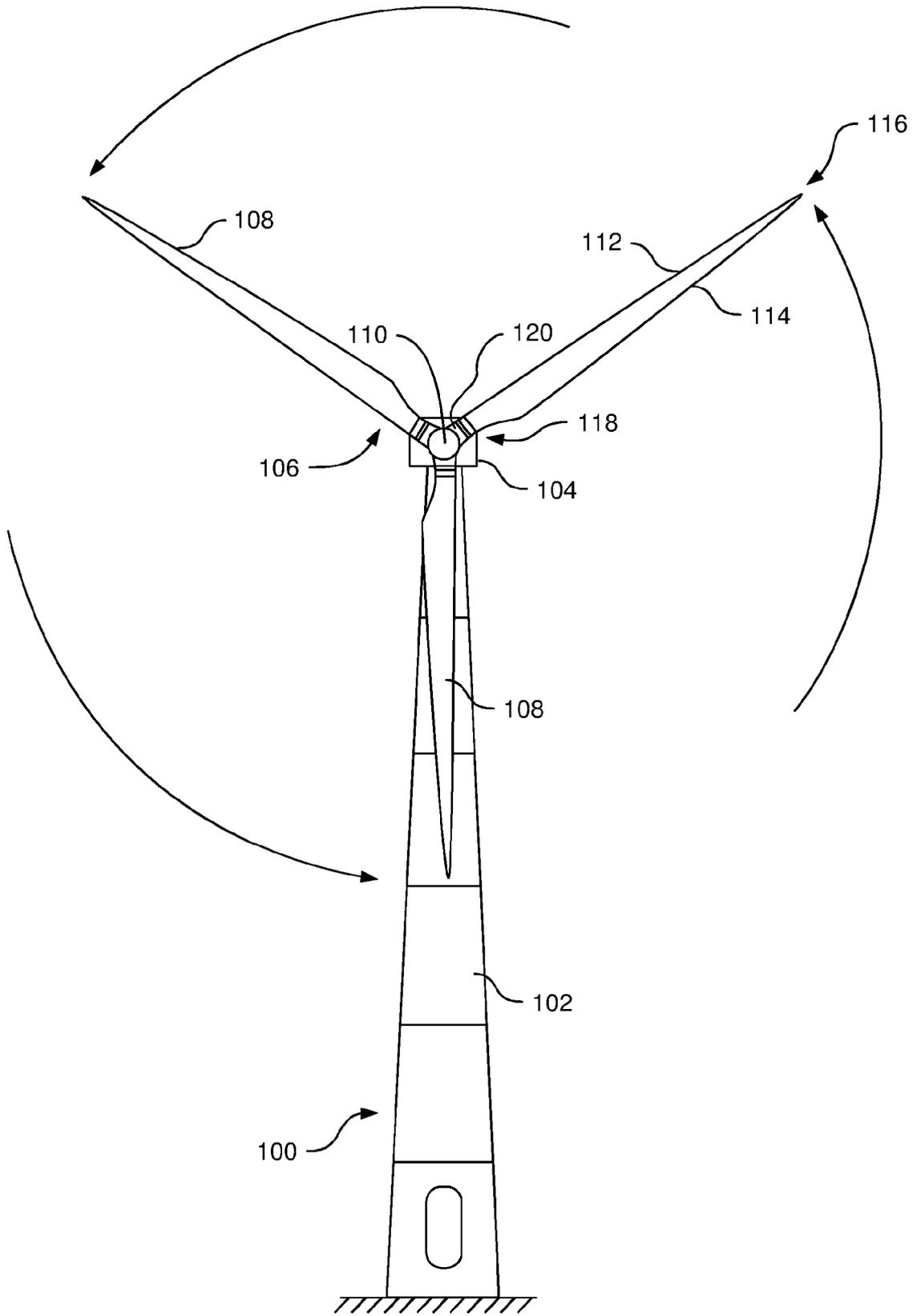


FIG. 1

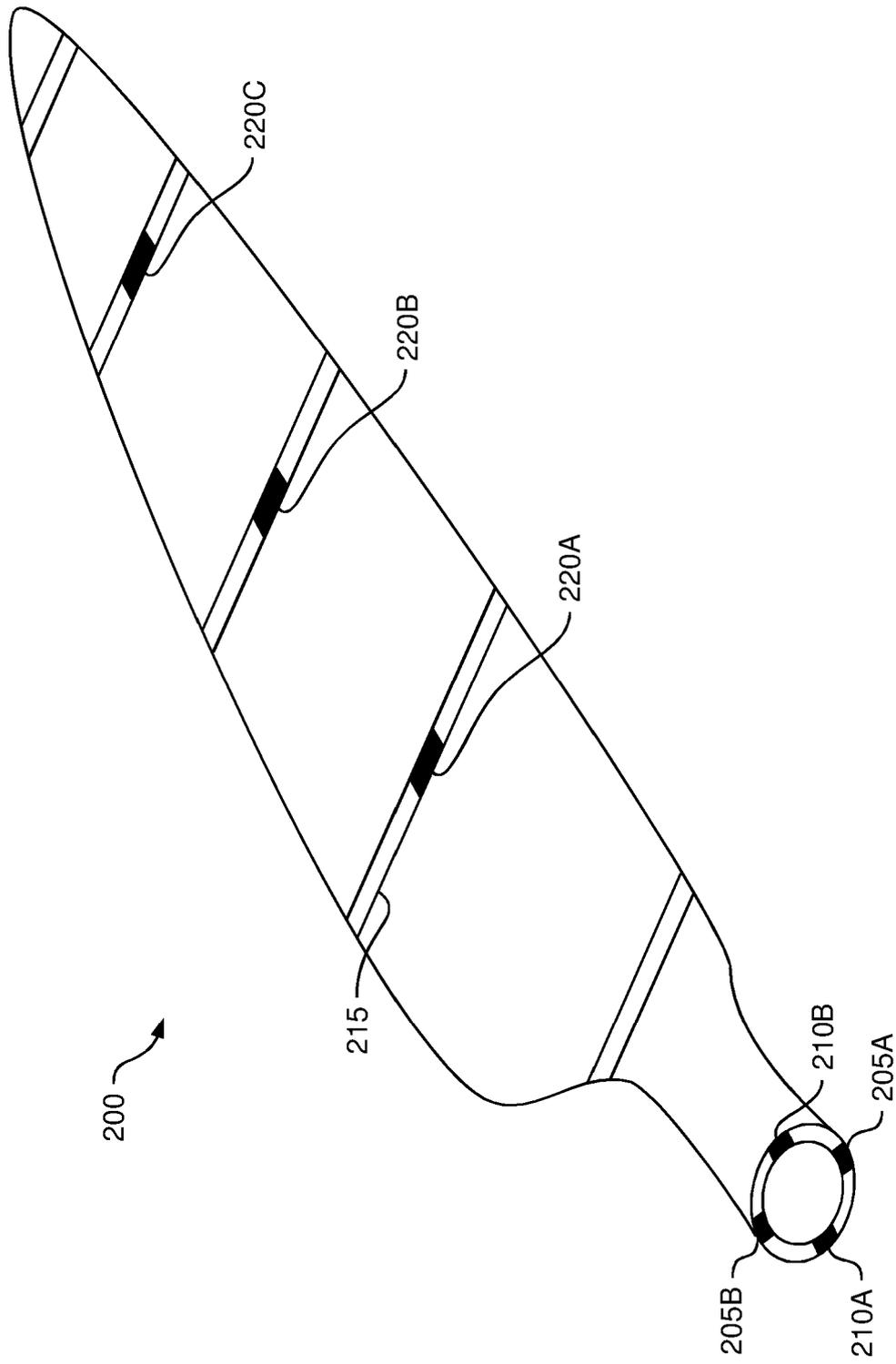


FIG. 2

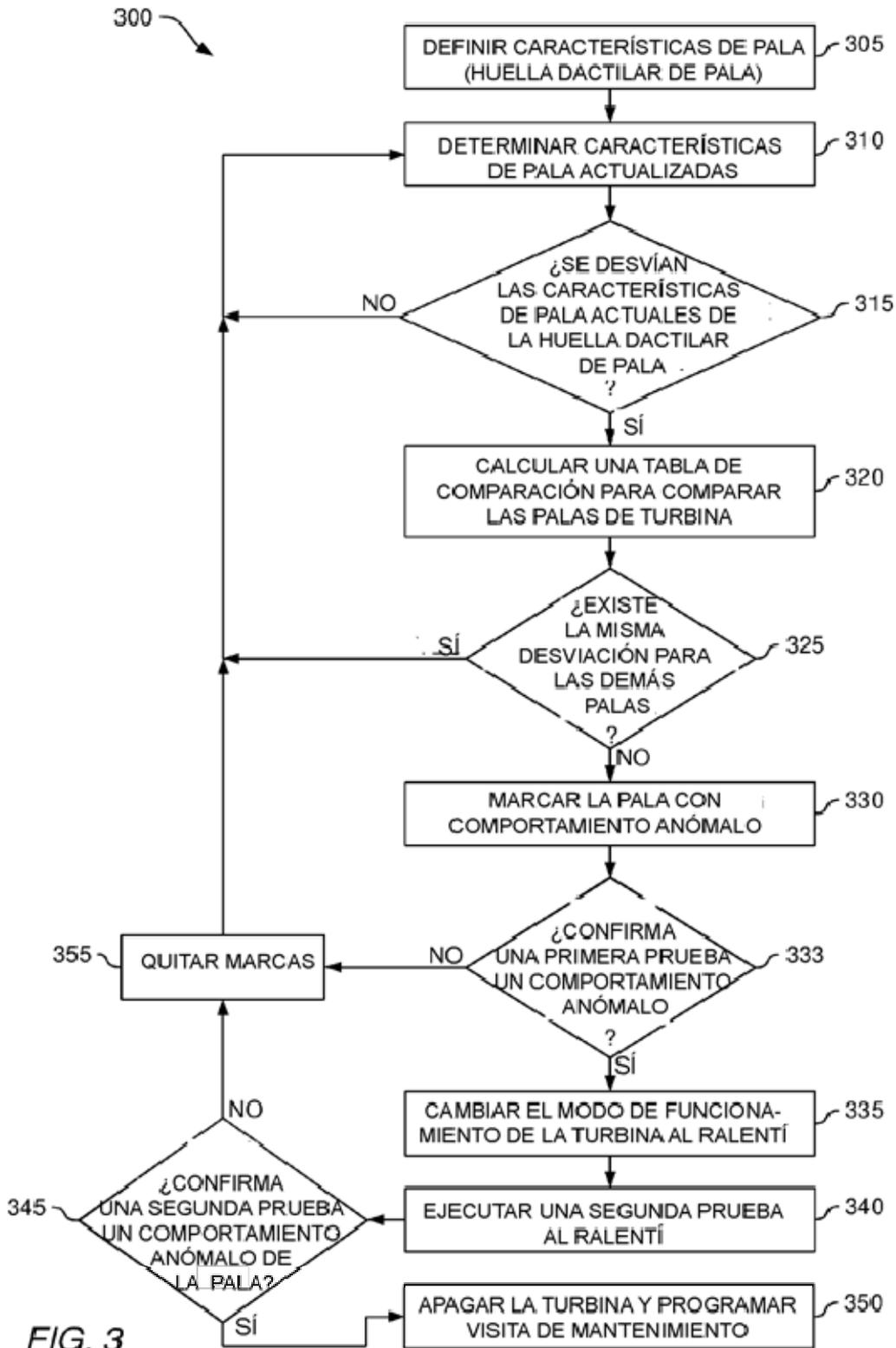


FIG. 3

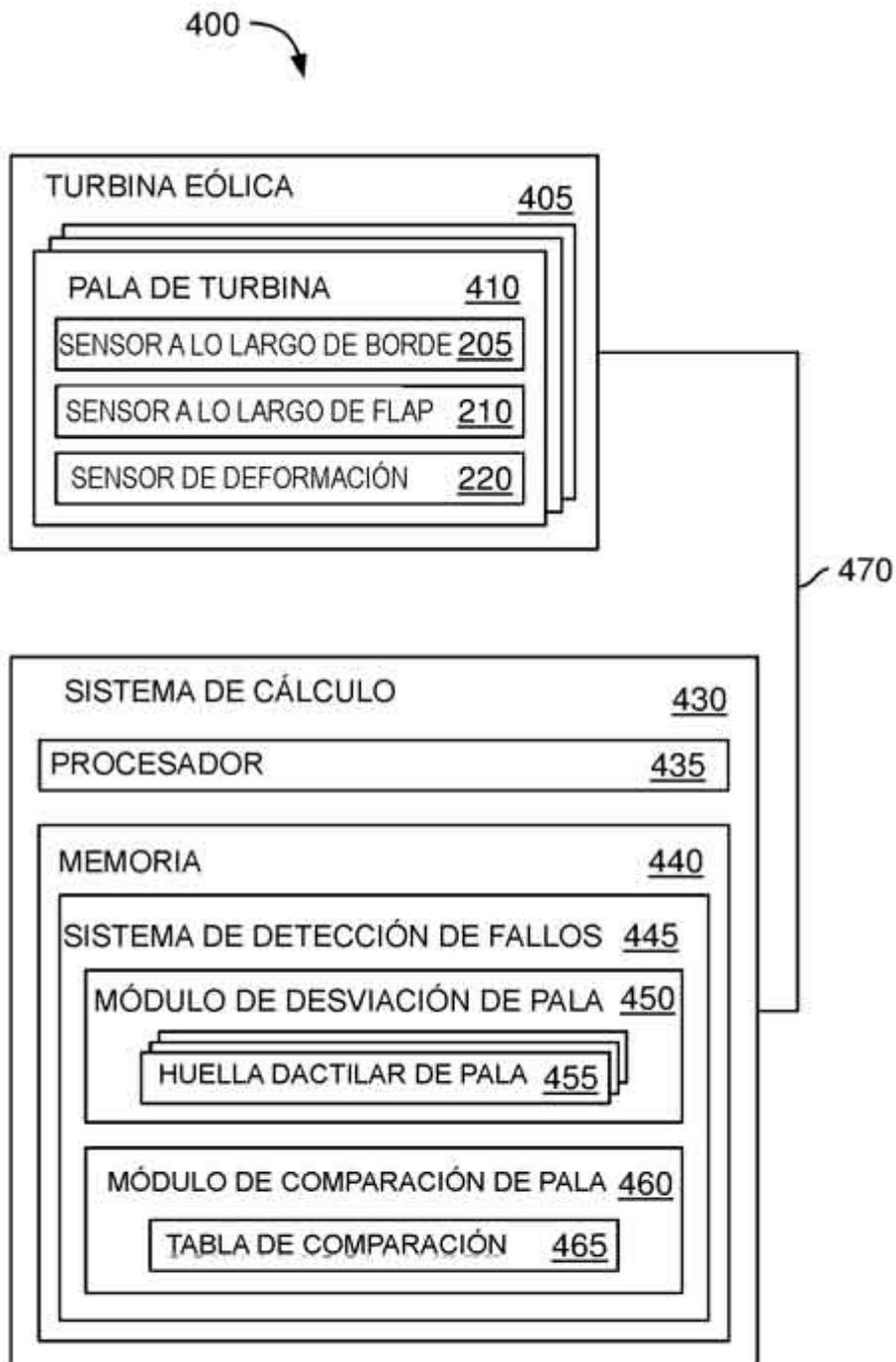


FIG. 4

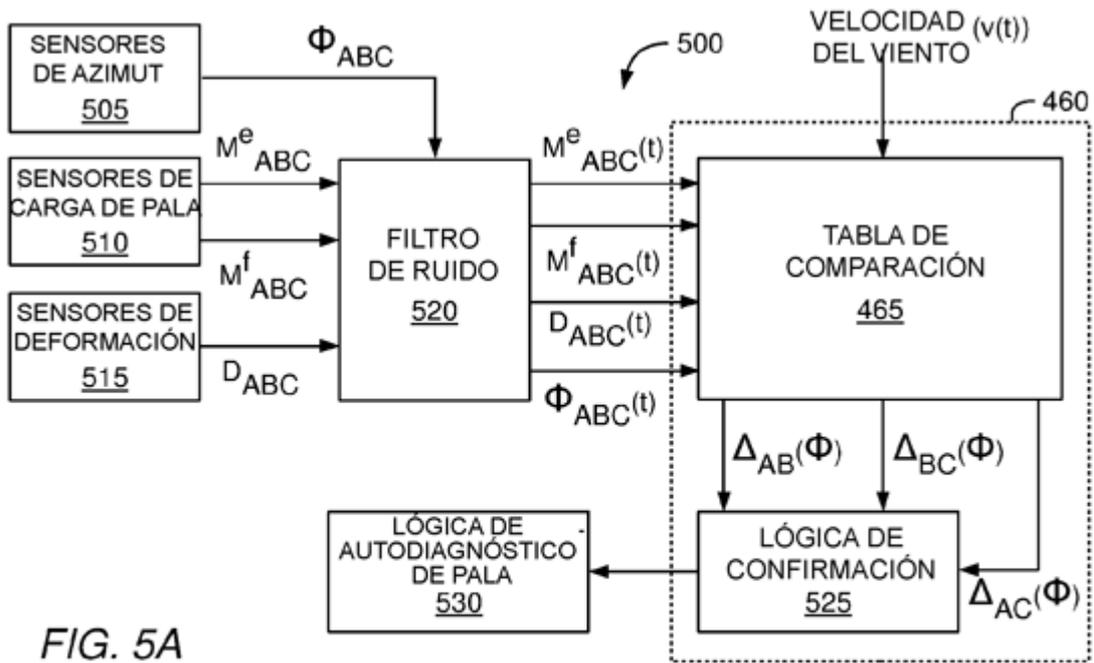


FIG. 5A

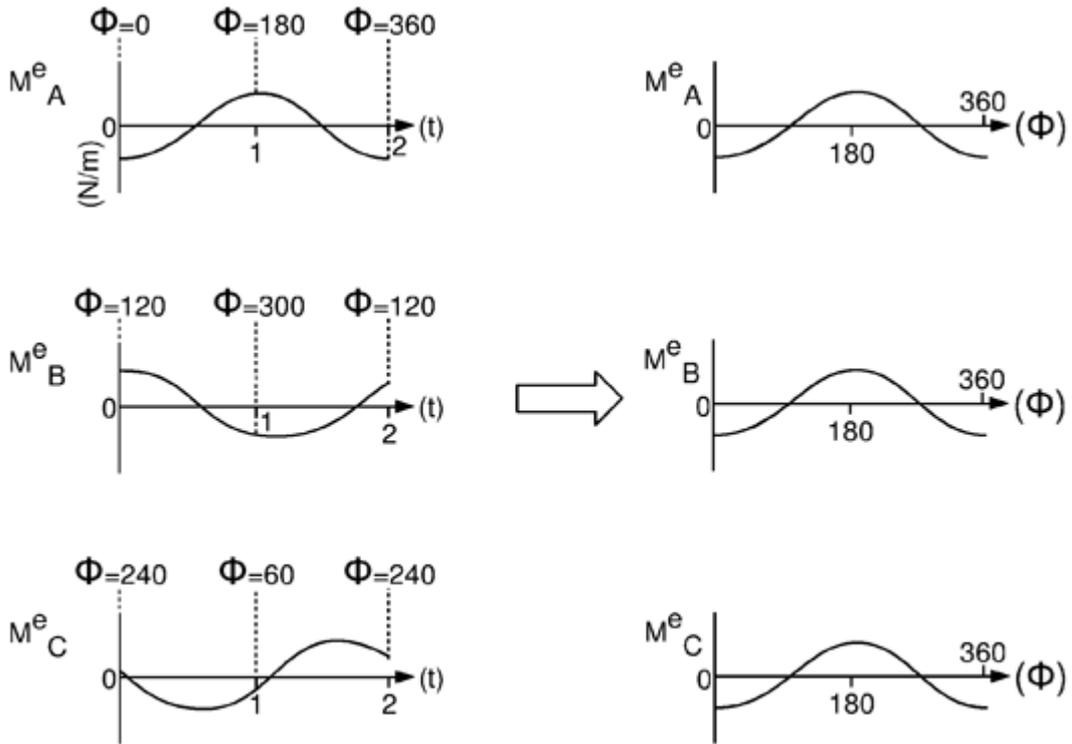


FIG. 5B

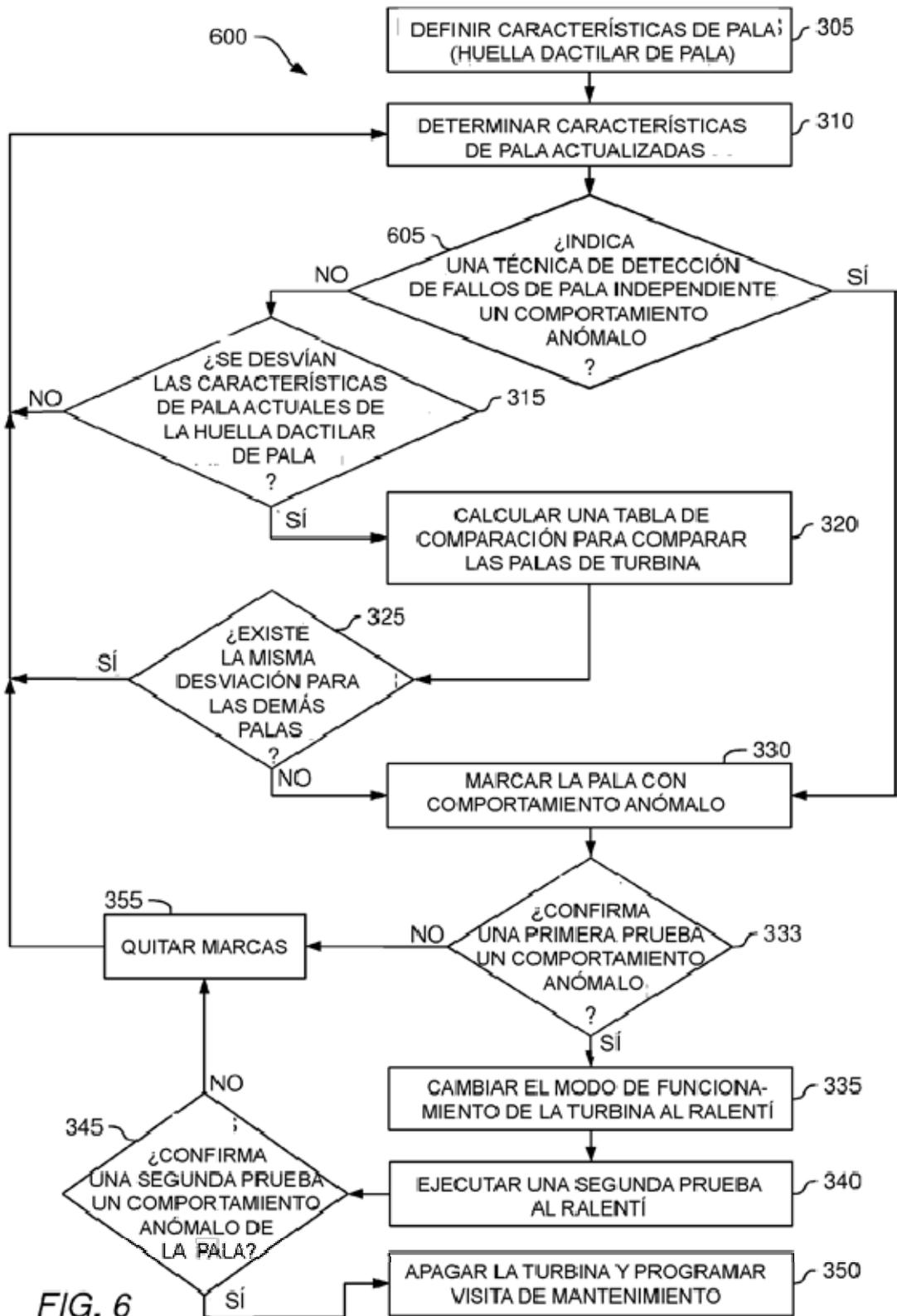


FIG. 6