

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 873 947**

51 Int. Cl.:

F03D 7/04 (2006.01)

F03D 17/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **09.11.2015** **PCT/US2015/059649**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.05.2016** **WO16077183**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.11.2015** **E 15797543 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.03.2021** **EP 3218600**

54 Título: **Sistema y procedimiento para estimar cargas de pala de rotor de una turbina eólica**

30 Prioridad:

13.11.2014 US 201414540275

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

04.11.2021

73 Titular/es:

GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)

**1 River Road
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**PERLEY, THOMAS FRANKLIN;
GERBER, BRANDON SHANE y
GERLOFF, TIM ROBERT**

74 Agente/Representante:

FORTEA LAGUNA, Juan José

ES 2 873 947 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

Sistema y procedimiento para estimar cargas de pala de rotor de una turbina eólica

5 **Campo de la invención**

[0001] La presente materia se refiere en general a las turbinas eólicas y, más en particular, a un sistema y procedimiento para estimar las cargas de pala de rotor que actúan sobre una turbina eólica.

10 **Antecedentes de la invención**

[0002] La fuerza del viento se considera una de las fuentes de energía más limpias y más respetuosas con el medio ambiente actualmente disponibles, y las turbinas eólicas han atraído más atención a este respecto. Una turbina eólica moderna incluye típicamente una torre, un generador, una multiplicadora, una góndola y una o más palas de rotor. Las palas de rotor son los elementos principales para convertir energía eólica en energía eléctrica. Las palas tienen típicamente el perfil de sección transversal de un plano aerodinámico de modo que, en operación, el aire fluye sobre la pala produciendo una diferencia de presión entre sus lados. En consecuencia, una fuerza de sustentación, que se dirige desde el lado de presión hacia el lado de succión, actúa sobre la pala. La fuerza de sustentación genera un par de torsión en el eje principal del rotor, que está conectado a un generador para producir electricidad.

[0003] La cantidad de potencia que puede producir una turbina eólica está típicamente limitada por unas limitaciones estructurales (es decir, cargas de diseño) de los componentes de turbina eólica individuales. Por ejemplo, la raíz de pala de una turbina eólica puede experimentar cargas (por ejemplo, un momento resultante de raíz de pala) asociadas tanto con la carga promedio debido al funcionamiento de la turbina como con unas cargas dinámicamente fluctuantes debido a unas condiciones ambientales. Dicha carga puede dañar los componentes de turbina, haciendo de este modo que los componentes de turbina fallen finalmente. Las cargas fluctuantes pueden cambiar de un día a otro o de una estación a otra y pueden estar basadas en la velocidad del viento, los picos de viento, la turbulencia del viento, la cizalladura del viento ("wind shear"), los cambios en la dirección del viento, la densidad en el aire, la desalineación de orientación, el flujo ascendente o similares. Específicamente, por ejemplo, las cargas experimentadas por una turbina eólica pueden variar con la velocidad del viento.

[0004] Así pues, es imperativo asegurar que las cargas que actúan sobre la turbina eólica no sobrepasen las cargas de diseño. Por tanto, muchas turbinas eólicas emplean uno o más sensores configurados para medir las cargas que actúan sobre los diversos componentes de turbina eólica. Aunque los sensores pueden proporcionar la información deseada, los nuevos sistemas sensores pueden ser complejos y costosos de instalar. Además, los sensores pueden proporcionar información inexacta y pueden ser propensos a los fallos.

[0005] Adicionalmente, las turbinas eólicas utilizan sistemas de control configurados para estimar unas cargas que actúan sobre la turbina eólica en base a un empuje ("thrust") de turbina eólica. Los términos "empuje", "valor de empuje", "parámetro de empuje" o similares, como se usan en el presente documento, pretenden englobar una fuerza que actúa sobre la turbina eólica debida al viento. La fuerza de empuje proviene de un cambio en la presión cuando el viento pasa por la turbina eólica y disminuye la velocidad. Dichas estrategias de control estiman unas cargas que actúan sobre la turbina eólica determinando un empuje estimado usando una pluralidad de condiciones operativas de turbina, tales como, por ejemplo, ángulo de pitch, potencia de salida, velocidad de generador y densidad de aire. Las condiciones operativas son entradas para el algoritmo, que incluye una serie de ecuaciones, uno o más mapas de rendimiento aerodinámico y una o más tablas de consulta (LUT). Por ejemplo, la LUT puede ser representativa de un empuje de turbina eólica. También se puede calcular una desviación estándar +/- del empuje estimado, junto con un empuje operativo máximo y un límite de empuje. Así pues, la turbina eólica se puede controlar en base a una diferencia entre el empuje máximo y el límite de empuje.

[0006] En vista de lo anterior, la técnica trata continuamente de encontrar sistemas nuevos y mejorados para estimar las cargas que actúan sobre una turbina eólica. El artículo "Repetitive Model Predictive Approach to Individual Pitch Control of Wind Turbine" de Friis *et al.*, Actas de la 50.^a IEEE CDC y ECC, 2011, muestra una forma de determinar los momentos que actúan sobre las palas de rotor. Por tanto, sería deseable disponer en la técnica de un sistema y procedimiento para estimar cargas de palas de rotor de turbina eólica, por ejemplo, un momento resultante de raíz de pala de una pala de rotor. Además, un sistema y procedimiento que incorporaran hardware y software existentes serían ventajosos.

Breve descripción de la invención

[0007] Los aspectos y las ventajas de la invención se expondrán en parte en la siguiente descripción, o pueden resultar obvios a partir de la descripción, o se pueden constatar mediante la puesta en práctica de la invención.

[0008] En un aspecto, la presente materia se dirige a un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 para estimar una carga de pala de rotor, por ejemplo, un momento resultante de raíz de pala, que actúa sobre una turbina eólica. El procedimiento incluye medir, por medio de uno o más sensores, una pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica. Otra etapa incluye estimar, por medio de un procesador, una fuerza fuera de plano y una fuerza en plano que actúan sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente a la pluralidad de parámetros operativos. Además, el procedimiento incluye determinar, por medio del procesador, un punto de aplicación de las fuerzas fuera de plano y en plano en un tramo de la pala de rotor. Otra etapa incluye estimar, por medio del procesador, los momentos fuera de plano y en plano de la pala de rotor en base al menos parcialmente a las fuerzas fuera de plano y en plano y los puntos de aplicación fuera de plano y en plano. Por tanto, el procedimiento incluye calcular, por medio del procesador, la carga de pala de rotor que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente al momento fuera de plano y el momento en plano.

[0009] En un modo de realización, la pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica puede incluir al menos uno de los siguientes: un empuje, una potencia, una velocidad, un par de torsión, un ángulo de pitch, un momento de cabeceo, un momento de voladizo, un ángulo de azimut de rotor, un momento de orientación ("yaw moment") o cualquier otro parámetro operativo de la turbina eólica. En otro modo de realización, el procedimiento puede incluir estimar el empuje utilizando al menos uno de los siguientes: una pluralidad de ecuaciones, uno o más mapas de rendimiento aerodinámico o una o más tablas de consulta.

[0010] En modos de realización adicionales, la etapa de estimar la fuerza de raíz fuera de plano puede incluir determinar una distribución de fuerza fuera de plano desde una raíz de pala hasta una punta de pala de rotor e integrar la distribución de fuerza fuera de plano para obtener una fuerza fuera de plano equivalente.

[0011] En otro modo de realización más, la etapa de determinar el punto de aplicación de la fuerza fuera de plano puede incluir determinar una pluralidad de puntos de aplicación de una pluralidad de fuerzas fuera de plano en operación de la turbina eólica para una pluralidad de velocidades del viento y almacenar la pluralidad de puntos de aplicación en un mapa de rendimiento aerodinámico.

[0012] Aún en otro modo de realización, el procedimiento puede incluir estimar el momento en plano de la pala de rotor en función de al menos uno de un peso de la pala de rotor, una carga de par mecánico de la pala de rotor, una velocidad de la pala de rotor, una potencia de la pala de rotor o una carga de inercia de la pala de rotor. Más específicamente, en un modo de realización, el procedimiento puede incluir calcular la carga de gravedad de la pala de rotor en función de al menos uno del ángulo de azimut de rotor, una masa de pala de rotor, una gravedad, un radio de buje o una ubicación de centro de gravedad de la pala de rotor. Además, el procedimiento puede incluir calcular la carga de par mecánico de la pala de rotor en función de al menos uno de un par de torsión o potencia de eje de baja velocidad, un radio de pala o el radio de buje. Además, el procedimiento puede incluir calcular la carga de inercia de la pala de rotor en función de al menos una de una aceleración de rotor o una inercia de rotor. En otros modos de realización más, el procedimiento puede incluir determinar la aceleración de rotor en base al menos parcialmente a una velocidad de cambio de una señal de velocidad de rotor y filtrar la señal de velocidad. Más específicamente, en un modo de realización, el procedimiento puede incluir filtrar la señal de velocidad a través de un filtro de paso bajo.

[0013] En modos de realización adicionales, el procedimiento también puede incluir estimar una fuerza de cizalladura en plano de la pala de rotor en función de al menos uno del ángulo de azimut de rotor, una masa de pala de rotor, un radio de pala de rotor, el punto de aplicación, un par de torsión, una aceleración de rotor filtrada, una inercia de rotor, una gravedad, una resistencia aerodinámica, una velocidad de viento y/o una ubicación de centro de gravedad. Además, el procedimiento puede incluir calcular la carga que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente a la fuerza de cizalladura en plano.

[0014] En otro aspecto, la presente divulgación está dirigida a un sistema de acuerdo con la reivindicación 13 para mantener unas cargas de pala de rotor de una turbina eólica dentro de límites predeterminados, a la vez que también se aumenta al máximo la salida de potencia. El sistema incluye uno o más sensores configurados para medir una pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica y un controlador configurado con el uno o más sensores. Además, el controlador incluye uno o más procesadores configurados para realizar una o más operaciones. Por ejemplo, en un modo de realización, las operaciones pueden incluir estimar una fuerza fuera de plano y una fuerza en plano que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente a la pluralidad de parámetros operativos, determinar un punto de aplicación de las fuerzas fuera de plano y en plano en un tramo de la pala de rotor, estimar un momento fuera de plano y en plano de la pala de rotor en base al menos parcialmente a las fuerzas fuera de plano y en plano y los puntos de aplicación fuera de plano y en plano, y calcular la carga de pala de rotor que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente al momento fuera de plano y al momento en plano. Se debe entender que el sistema se puede configurar además con cualquiera de las características adicionales que se describen en el presente documento y puede implementar cualquiera de las etapas de procedimiento adicionales que se describen en el presente documento también.

[0015] Aún en otro aspecto, la presente divulgación está dirigida a un procedimiento para estimar un momento de raíz de pala fuera de plano de la pala de rotor. El procedimiento incluye medir una pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica. Por ejemplo, los parámetros operativos pueden incluir al menos uno de los siguientes: un empuje, un momento de cabeceo, un momento de voladizo, un ángulo de azimut de rotor o un momento de orientación. Otra etapa incluye estimar una fuerza fuera de plano que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente a la pluralidad de parámetros operativos. El procedimiento también incluye determinar un punto de aplicación en la pala de rotor de la fuerza fuera de plano. Por tanto, el momento de raíz de pala fuera de plano se determina en función de la fuerza fuera de plano y el punto de aplicación de la fuerza fuera de plano.

[0016] Estas y otras características, aspectos y ventajas de la presente invención se comprenderán mejor con referencia a la siguiente descripción y reivindicaciones adjuntas. Los dibujos adjuntos, que están incorporados en, y que forman parte de, esta memoria descriptiva, ilustran modos de realización de la invención y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención.

Breve descripción de los dibujos

[0017] Una descripción completa y suficiente de la presente invención, incluyendo el mejor modo de la misma, dirigida a un experto en la técnica, se establece en la memoria descriptiva, que hace referencia a las figuras adjuntas, en las cuales:

la FIG. 1 ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 2 ilustra una vista interna simplificada de un modo de realización de una góndola de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 3 ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de un controlador de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 4 ilustra un gráfico de un modo de realización de los puntos de aplicación para las fuerzas fuera de plano y en plano que actúan sobre una pala de rotor en función de una velocidad de viento de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 5 ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de una distribución de fuerza fuera de plano de una pala de rotor de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 6 ilustra un diagrama de cuerpo libre (Free Body Diagram "FBD") de un modo de realización de un rotor de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación;

la FIG. 7 ilustra un gráfico que compara el momento resultante de raíz de pala estimado y el momento resultante de raíz de pala medido de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación;

la FIG. 8 ilustra un gráfico del momento resultante de raíz de pala medido representado en el eje x y el momento resultante de raíz de pala estimado representado en el eje y de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación;

la FIG. 9 ilustra un gráfico que compara el empuje estimado y el momento resultante de raíz de pala medido de acuerdo con una construcción convencional;

la FIG. 10 ilustra un gráfico del momento resultante de raíz de pala medido representado en el eje x y el empuje estimado representado en el eje y de acuerdo con una construcción convencional;

la FIG. 11 ilustra un diagrama de flujo simplificado de un modo de realización de unas etapas emprendidas por el controlador para calcular un error de momento resultante de raíz de pala de acuerdo con la presente divulgación; y

la FIG. 12 ilustra un diagrama de flujo de un modo de realización de un procedimiento para estimar una carga de pala de rotor de una turbina eólica de acuerdo con la presente divulgación.

Descripción detallada de la invención

[0018] A continuación, se hará referencia en detalle a unos modos de realización de la invención, uno o más ejemplos de los cuales están ilustrados en los dibujos. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación de la invención, y no como una limitación de la invención. De hecho, será evidente para los expertos en la técnica que se pueden hacer diversas modificaciones y variaciones en la presente invención sin apartarse del alcance

de la invención. Por ejemplo, las características ilustradas o descritas como parte de un modo de realización se pueden usar con otro modo de realización para producir otro modo de realización más. Por tanto, se pretende que la presente invención cubra dichas modificaciones y variaciones tal como aparecen dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

[0019] En general, la presente materia está dirigida a unos sistemas y procedimientos mejorados para estimar unas cargas de pala de rotor de una turbina eólica. En un modo de realización, por ejemplo, el sistema recopila y almacena parámetros operativos de la turbina eólica. Por lo tanto, el sistema está configurado para estimar unas fuerzas fuera de plano y en plano que actúan sobre la pala de rotor en base a los parámetros operativos. El sistema también está configurado para determinar un punto de aplicación de las fuerzas fuera de plano y en plano a lo largo de un tramo de la pala de rotor. Así pues, el sistema puede estimar a continuación un momento de raíz de pala fuera de plano y en plano en base a las fuerzas fuera de plano y en plano y los puntos de aplicación fuera de plano y en plano. En consecuencia, el sistema está configurado para determinar un momento resultante de raíz de pala de la pala de rotor en base al menos parcialmente al momento de raíz de pala fuera de plano y el momento de raíz de pala en plano.

[0020] Los diversos modos de realización del sistema y procedimiento descritos en el presente documento proporcionan numerosas ventajas. Por ejemplo, la presente divulgación mantiene las cargas de pala de rotor dentro de límites predeterminados, al tiempo que aumenta al máximo la producción de energía anual (AEP). Por tanto, la presente divulgación puede ayudar a prevenir un fallo de componente de turbina causado por una carga de pala excesiva. Además, la presente divulgación se puede implementar usando componentes existentes de la turbina eólica y no requiere sensores adicionales. Así pues, no se requiere que un usuario compre, instale y mantenga un equipo nuevo. Además, el sistema puede estar integrado con un sistema de control más amplio, tal como, pero sin limitarse a, un sistema de control de turbina eólica, un sistema de control de planta, un sistema de monitorización remoto o combinaciones de los mismos.

[0021] En referencia ahora a la FIG. 1, se ilustra una vista en perspectiva de un modo de realización de una turbina eólica 10 que puede implementar la tecnología de control de acuerdo con la presente divulgación. Como se muestra, la turbina eólica 10 incluye en general una torre 12 que se extiende desde una superficie de apoyo 14, una góndola 16 montada sobre la torre 12 y un rotor 18 acoplado a la góndola 16. El rotor 18 incluye un buje rotatorio 20 y al menos una pala de rotor 22 acoplada a, y que se extiende hacia el exterior de, el buje 20. Por ejemplo, en el modo de realización ilustrado, el rotor 18 incluye tres palas de rotor 22. Sin embargo, en un modo de realización alternativo, el rotor 18 puede incluir más o menos de tres palas de rotor 22. Cada pala de rotor 22 se puede espaciar alrededor del buje 20 para facilitar la rotación del rotor 18 y permitir que se transfiera energía cinética del viento como energía mecánica usable y, posteriormente, energía eléctrica. Por ejemplo, el buje 20 puede estar acoplado rotatoriamente a un generador eléctrico 24 (FIG. 2) situado dentro de la góndola 16 para permitir que se produzca energía eléctrica.

[0022] La turbina eólica 10 también puede incluir un controlador de turbina eólica 26 centralizado dentro de la góndola 16. Sin embargo, en otros modos de realización, el controlador 26 puede estar localizado dentro de cualquier otro componente de la turbina eólica 10 o en una ubicación fuera de la turbina eólica. Además, el controlador 26 puede estar acoplado comunicativamente a cualquier número de los componentes de la turbina eólica 10 para controlar el funcionamiento de dichos componentes y/o para implementar una acción de corrección. Así pues, el controlador 26 puede incluir un ordenador u otra unidad de procesamiento adecuada. Por tanto, en varios modos de realización, el controlador 26 puede incluir instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando se implementan, configuran el controlador 26 para que realice diversas funciones diferentes, tales como recibir, transmitir y/o ejecutar señales de control de turbina eólica. En consecuencia, el controlador 26 puede estar configurado en general para controlar los diversos modos operativos (por ejemplo, secuencias de arranque o de parada), reducir la potencia nominal de la turbina eólica y/o controlar diversos componentes de la turbina eólica 10, como se analizará con más detalle a continuación.

[0023] En referencia ahora a la FIG. 2, se ilustra una vista interna simplificada de un modo de realización de la góndola 16 de la turbina eólica 10 mostrada en la FIG. 1. Como se muestra, el generador 24 puede estar acoplado al rotor 18 para producir potencia eléctrica a partir de la energía de rotación generada por el rotor 18. Por ejemplo, como se muestra en el modo de realización ilustrado, el rotor 18 puede incluir un eje de rotor 34 acoplado al buje 20 para su rotación con el mismo. El eje de rotor 34, a su vez, puede estar acoplado rotatoriamente a un eje de generador 36 del generador 24 a través de una multiplicadora 38. Como se entiende en general, el eje de rotor 34 puede proporcionar una entrada de par de torsión alto y baja velocidad a la multiplicadora 38 como respuesta a la rotación de las palas de rotor 22 y del buje 20. A continuación, la multiplicadora 38 se puede configurar para convertir la entrada de par de torsión alto y baja velocidad en una salida de par de torsión bajo y alta velocidad para accionar el eje de generador 36 y, por tanto, el generador 24.

[0024] Cada pala de rotor 22 también puede incluir un mecanismo de ajuste de pitch 32 configurado para hacer girar cada pala de rotor 22 alrededor de su eje de pitch 28. Además, cada mecanismo de ajuste de pitch 32 puede incluir un motor de accionamiento de pitch 40 (por ejemplo, cualquier motor eléctrico, hidráulico o

neumático adecuado), una multiplicadora de accionamiento de pitch 42 y un piñón de accionamiento de pitch 44. En dichos modos de realización, el motor de accionamiento de pitch 40 puede estar acoplado a la multiplicadora de accionamiento de pitch 42 de modo que el motor de accionamiento de pitch 40 imparta fuerza mecánica a la multiplicadora de accionamiento de pitch 42. De forma similar, la multiplicadora de accionamiento de pitch 42 puede estar acoplada al piñón de accionamiento de pitch 44 para su rotación con el mismo. El piñón de accionamiento de pitch 44 puede estar, a su vez, engranado rotatoriamente con un rodamiento de pitch 46 acoplado entre el buje 20 y una pala de rotor 22 correspondiente de modo que una rotación del piñón de accionamiento de pitch 44 causa una rotación del rodamiento de pitch 46. Por tanto, en dichos modos de realización, la rotación del motor de accionamiento de pitch 40 acciona la multiplicadora de accionamiento de pitch 42 y el piñón de accionamiento de pitch 44, haciendo girar de este modo el rodamiento de pitch 46 y la pala de rotor 22 alrededor del eje de pitch 28. De forma similar, la turbina eólica 10 puede incluir uno o más mecanismos de accionamiento de orientación 66 acoplados comunicativamente al controlador 26, estando configurado cada mecanismo de accionamiento de orientación 66 para cambiar el ángulo de la góndola 16 en relación con el viento (por ejemplo, engranando con un rodamiento de orientación 68 de la turbina eólica 10).

[0025] Todavía en referencia a la FIG. 2, la turbina eólica 10 también puede incluir uno o más sensores 48, 50 para medir diversos parámetros operativos que se pueden requerir para calcular los momentos fuera de plano y en plano como se describe con más detalle a continuación. Por ejemplo, en diversos modos de realización, los sensores pueden incluir sensores de pala 48 para medir un ángulo de pitch de una de las palas de rotor 22 o para medir una carga que actúa sobre una de las palas de rotor 22; sensores de generador (no mostrados) para monitorizar el generador 24 (por ejemplo, el par de torsión, la velocidad de rotación, la aceleración y/o la potencia de salida); sensores para medir la carga de desequilibrio en el rotor (por ejemplo, unos sensores de flexión de eje principal); y/o varios sensores de viento 50 para medir diversos parámetros de viento, tales como velocidad del viento, picos de viento, turbulencia del viento, cizalladura del viento, cambios en la dirección del viento, densidad del aire o similares. Además, los sensores pueden estar localizados cerca del suelo de la turbina eólica, en la góndola o en un mástil meteorológico de la turbina eólica. También se debe entender que se puede emplear cualquier otro número o tipo de sensores y en cualquier ubicación. Por ejemplo, los sensores pueden ser unidades de medición microinercial (MIMU), galgas extensométricas, acelerómetros, sensores de presión, sensores de ángulo de ataque, sensores de vibración, sensores de proximidad, sensores de detección y cálculo de distancia mediante luz (LIDAR), sistemas de cámaras, sistemas de fibra óptica, anemómetros, veletas, sensores de detección y cálculo de distancia mediante sonidos (SODAR), infraláseres, radiómetros, tubos de Pitot, radiosondas, otros sensores ópticos y/o cualquier otro sensor adecuado. Se debe apreciar que, como se usa en el presente documento, el término "monitorizar" y variantes del mismo indican que los diversos sensores pueden estar configurados para proporcionar una medición directa de los parámetros que se están monitorizando o una medición indirecta de dichos parámetros. Por tanto, los sensores se pueden usar, por ejemplo, para generar señales relativas al parámetro que se está monitorizando, que a continuación el controlador 26 puede utilizar para determinar el parámetro real.

[0026] En referencia ahora a la FIG. 3, se ilustra un diagrama de bloques de un modo de realización de diversos componentes del controlador 26 de acuerdo con la presente divulgación. Como se muestra, el controlador 26 puede incluir uno o más procesadores 58 y dispositivos de memoria asociados 60 configurados para realizar una variedad de funciones implementadas por ordenador (por ejemplo, realizar los procedimientos, las etapas, los cálculos y similares y almacenar datos pertinentes como se divulga en el presente documento). Adicionalmente, el controlador 26 también puede incluir un módulo de comunicaciones 62 para facilitar las comunicaciones entre el controlador 26 y los diversos componentes de la turbina eólica 10. Además, el módulo de comunicaciones 62 puede incluir una interfaz de sensor 64 (por ejemplo, uno o más convertidores analógico-digital) para permitir que las señales transmitidas desde los sensores 48, 50 se conviertan en señales que los procesadores 58 puedan comprender y procesar. Se debe apreciar que los sensores 48, 50 se pueden acoplar comunicativamente al módulo de comunicaciones 62 usando cualquier medio adecuado. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 3, los sensores 48, 50 se acoplan a la interfaz de sensor 64 por medio de una conexión alámbrica. Sin embargo, en otros modos de realización, los sensores 48, 50 se pueden acoplar a la interfaz de sensor 64 por medio de una conexión inalámbrica, por ejemplo, usando cualquier protocolo de comunicaciones inalámbricas adecuado conocido en la técnica.

[0027] Como se usa en el presente documento, el término "procesador" no solo se refiere a circuitos integrados que en la técnica aparecen incluidos en un ordenador, sino que también se refiere a un controlador, un microcontrolador, un microordenador, un controlador lógico programable (PLC), un circuito integrado específico de la aplicación y otros circuitos programables. Adicionalmente, el (los) dispositivo(s) de memoria 60 en general puede(n) comprender uno(s) elemento(s) de memoria que incluye(n), pero sin limitarse a, un medio legible por ordenador (por ejemplo, memoria de acceso aleatorio (RAM)), un medio no volátil legible por ordenador (por ejemplo, una memoria *flash*), un disquete, una memoria de solo lectura de disco compacto (CD-ROM), un disco magnetoóptico (MOD), un disco versátil digital (DVD) y/u otros elementos de memoria adecuados. Dicho(s) dispositivo(s) de memoria 60 puede(n) estar configurado(s) en general para almacenar instrucciones legibles por ordenador adecuadas que, cuando son implementadas por el (los) procesador(es) 58, configuran el controlador 26 para que realice diversas funciones que incluyen, pero sin limitarse a, determinar uno o más parámetros actuales de turbina eólica 10 en base a la pluralidad de datos operativos,

determinar un parámetro de turbina eólica máximo, transmitir señales de control adecuadas para implementar acciones de control para reducir unas cargas que actúan sobre la turbina eólica, y otras diversas funciones implementadas por ordenador adecuadas.

[0028] El procesador 58 está configurado para utilizar los parámetros operativos medidos de los sensores 48, 50 para estimar unas cargas de pala de rotor (por ejemplo, momentos y/o fuerzas resultantes de raíz de pala) de la turbina eólica 10. Por ejemplo, los sensores 48, 50 están configurados para medir diversas condiciones de turbina eólica y/o ambientales, de modo que proporcionen directa o indirectamente información con respecto a uno o más de los siguientes parámetros: un empuje de rotor, un par mecánico, puntos de aplicación en plano y fuera de plano de fuerzas que actúan sobre las palas de rotor 22, mediciones de desequilibrio de rotor, un ángulo de azimut de rotor, una velocidad de rotor, una relación de multiplicadora, un momento de cabeceo, un momento de voladizo, un momento de orientación, una gravedad, un radio de buje, un radio de pala, un ángulo de conicidad, una masa de pala, un peso de pala, una ubicación de centro de gravedad para cada una de las palas de rotor 22, o cualquier otro parámetro operativo de la turbina eólica 10. Más específicamente, la tabla 1 a continuación ilustra un conjunto de muestras de entradas que el procesador 58 puede usar para estimar las estimaciones de carga como se describe en el presente documento.

Tabla 1: Descripción de entradas de estimación de momento resultante de raíz de pala

Parámetro	Descripción
PuntoAplicaciónFP	Radio de fracción a lo largo de pala donde se aplica fuerza de empuje aerodinámica integrada
PuntoAplicaciónEP	Radio de fracción a lo largo de pala donde se aplica fuerza aerodinámica en plano integrada
CTAcRotor	Constante de tiempo de filtro de paso bajo de 1.º orden para señal de aceleración de rotor
RadioPala	Radio de pala
MasaPala	Masa de pala
Inercia de rotor	Inercia de giro
Ángulo de conicidad	Ángulo de conicidad de rotor
UbCG	Punto de aplicación de centro de gravedad desde vértice de rotor
COBuje	Radio de buje
Relación de multiplicadora	Relación de multiplicadora
Momento de voladizo	Momento de voladizo de rotor + buje alrededor de ubicación de brida de buje
Gravedad	Gravedad

[0029] En la mayoría de los modos de realización, las entradas de la tabla 1 están fácilmente disponibles y son fáciles de calcular y/o medir; sin embargo, la presente divulgación proporciona procedimientos únicos para calcular uno o más de los parámetros, por ejemplo, PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP. Más específicamente, en un modo de realización, el PuntoAplicaciónFP es una función de la ratio de velocidad de punta (TSR) y el ángulo de pitch y se puede definir en operación de la turbina como se muestra en la ecuación (1) a continuación:

$$\text{PuntoAplicaciónFP}(\text{TSR}, \text{ángulo de pitch}) = \frac{\text{Npalas} \cdot \text{Momento Fuera de Plano}(\text{TSR}, \text{ángulo de pitch})}{\text{Empuje}(\text{TSR}, \text{ángulo de pitch}) \cdot \text{Radio de pala}}$$

Ecuación
(1)

donde

Npalas es igual al número de palas de la turbina eólica.

[0030] Además, PuntoAplicaciónEP se puede definir de manera similar a la ecuación (2) a continuación:

$$\frac{\text{PuntoAplicaciónEP}(\text{TSR}, \text{ángulo de pitch})}{\text{Par de torsión}(\text{TSR}, \text{ángulo de pitch})} = \frac{\text{Npalas} * \text{Fuerza de cizalladura en plano}(\text{TSR}, \text{ángulo de pitch}) * \text{Radio de pala}}{\text{Ecuación}} \quad (2)$$

[0031] Por tanto, los valores calculados para PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP se pueden almacenar en el dispositivo de memoria 60 en una tabla. En consecuencia, en un modo de realización, los valores pueden promediar y los promedios de PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP se pueden usar para calcular el momento resultante de raíz de pala que se describe con más detalle a continuación.

[0032] En referencia ahora a la FIG. 4, se ilustra un gráfico de valores PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP en función de una velocidad de viento para el funcionamiento nominal de la turbina. Más específicamente, como se muestra, el PuntoAplicaciónFP promedio es de aproximadamente 0,75 (es decir, está localizado en el 75 % de la envergadura de la pala de rotor 22), mientras que el PuntoAplicaciónEP promedio es de aproximadamente 0,5 (es decir, está localizado en el 50 % de la envergadura de la pala de rotor 22), y se proporcionan como simples ejemplos de valores PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP adecuados.

[0033] En un modo de realización alternativo, PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP se pueden calcular durante el proceso de mapeo de rendimiento aerodinámico. Los mapas de rendimiento aerodinámico que se describen en el presente documento son tablas dimensionales o no dimensionales que describen la carga y el rendimiento del rotor (por ejemplo, potencia, empuje, par de torsión o momento de flexión o similares) en determinadas condiciones (por ejemplo, densidad, velocidad de viento, velocidad de rotor, ángulos de pitch o similares). Así pues, los mapas de rendimiento aerodinámico pueden incluir: un coeficiente de potencia, un coeficiente de empuje, un coeficiente de par de torsión y/o unas derivadas parciales con respecto a un ángulo de pitch, una velocidad de rotor y una ratio de velocidad de punta (TSR) y, en este caso, los puntos de aplicación de las fuerzas que actúan sobre la pala de rotor. De forma alternativa, los mapas de rendimiento aerodinámico pueden ser valores dimensionales de potencia, de empuje y/o de par de torsión en lugar de coeficientes. Por tanto, en un modo de realización determinado, el procesador 58 está configurado para determinar el punto de aplicación fuera de plano determinando una pluralidad de puntos de aplicación de una pluralidad de fuerzas fuera de plano en operación de la turbina eólica para una pluralidad de velocidades de viento, y almacenar la pluralidad de puntos de aplicación en un mapa de rendimiento aerodinámico. Este enfoque permite estimaciones más precisas de la carga de raíz de pala durante los períodos en operación no nominal, ya que dichos puntos de aplicación de fuerza varían en función de la velocidad del viento/velocidad del rotor (ratio de velocidad de punta) y el ángulo de pitch (en operación no nominal típicamente es cuando se producen picos de carga). En modos de realización adicionales, el procesador 58 está configurado para evitar la introducción de una rigidez estructural o dependencia geométrica de la turbina en los mapas de rendimiento aerodinámico cuando se integra PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 5, se ilustra un diagrama esquemático de un modo de realización de una distribución de fuerza fuera de plano desde la raíz de pala hasta la punta de la pala de rotor 22. Integrando el área bajo la curva de distribución de fuerza fuera de plano, se puede determinar la fuerza fuera de plano integrada o equivalente y el punto de aplicación r correspondiente a lo largo de la pala de rotor 22.

[0034] En consecuencia, el procesador 58 está configurado para utilizar los parámetros operativos, así como PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP, para estimar diversos componentes de carga del momento resultante de raíz de pala, incluyendo al menos una fuerza de cizalladura fuera de plano, una fuerza de cizalladura en plano, una fuerza axial, un momento de raíz de pala fuera de plano, un momento de raíz de pala en plano y una torsión de pala. Se debe entender que los cálculos de momento resultante de raíz de pala como se describen en el presente documento están dirigidos a la turbina eólica 10 que tiene tres palas de rotor 22; sin embargo, dichos cálculos se proporcionan solo con propósitos de ejemplo y no pretenden ser limitantes. Por tanto, los cálculos descritos en el presente documento se pueden aplicar a una turbina eólica que tenga cualquier número de palas adecuado. Además, en diversos modos de realización, se supone que PuntoAplicaciónFP y PuntoAplicaciónEP son iguales para las tres palas de rotor y que no varían con la TSR de pala y/o el ángulo de pitch individuales.

[0035] Más específicamente, en determinados modos de realización, el procesador 58 está configurado para calcular el momento de raíz fuera de plano de cada pala de rotor 22 en función de uno o más del punto de aplicación fuera de plano r de la fuerza (es decir, PuntoAplicaciónFP), el radio de pala, la ubicación del centro de gravedad, la gravedad, la carga de desequilibrio del rotor y/o el ángulo de azimut del rotor. Por ejemplo, en referencia ahora a la FIG. 6, se ilustra un diagrama de cuerpo libre (FBD) del rotor de turbina eólica 18. Como se muestra, el ángulo de azimut de rotor θ se referencia desde la pala de rotor 1 (es decir, B1), incrementándose θ a medida que las palas (es decir, B1, B2 y B3) giran en sentido horario. Por tanto, θ está entre 0° y 360°, definiéndose 0° como B1 en la posición de las 12 en punto. Las fuerzas de pala, a saber, las fuerzas F1, F2,

F3, son las fuerzas fuera de plano que "entran en la página" debido a la aerodinámica (despreciando la carga centrífuga de la masa giratoria con un rotor cónico). Se supone que dichas fuerzas se aplican en unos puntos de aplicación r respectivos, que se supone que son los mismos para las tres palas de rotor.

- 5 **[0036]** Por tanto, las tres ecuaciones mostradas a continuación (ecuaciones 3-5) que tienen tres incógnitas (es decir, las fuerzas F_1 , F_2 , F_3) se pueden desarrollar y resolver usando diversos procedimientos conocidos en la técnica.

$$\text{Empuje estimado} = F_1 + F_2 + F_3 \quad \text{Ecuación}$$

(3)

$$\text{Momento de cabeceo medido} - \text{Momento de voladizo estático} =$$

$$F_1 r \cos(\theta) + F_2 r \cos(\theta - 120^\circ) + F_3 r \cos(\theta - 240^\circ)$$

Ecuación

(4)

10

$$\text{Momento de orientación medido} = F_1 r \sin(\theta) + F_2 r \sin(\theta - 120^\circ) + F_3 r \sin(\theta - 240^\circ)$$

Ecuación

(5)

- 15 **[0037]** El empuje estimado se puede determinar usando una variedad de técnicas. Por ejemplo, en un modo de realización, el estimador de parámetros de viento 56 puede estar configurado para implementar un algoritmo de control que tiene una serie de ecuaciones para determinar el empuje estimado. Así pues, las ecuaciones se resuelven usando uno o más parámetros operativos, uno o más mapas de rendimiento aerodinámico, una o más LUT o cualquier combinación de los mismos. Como se ha mencionado, los mapas de rendimiento aerodinámico describen la carga y el rendimiento del rotor (por ejemplo, la potencia, el empuje, el par de torsión o el momento de flexión o similares) en determinadas condiciones (por ejemplo, de densidad, velocidad del viento, velocidad del rotor, ángulos de pitch o similares). Además, las LUT pueden incluir: cargas de pala, cargas de torre, cargas de eje o cualquier otra carga de componente de turbina eólica.

- 20 **[0038]** El momento de cabeceo medido también se puede determinar usando una variedad de técnicas. Además, se debe entender que el momento de cabeceo medido al que se hace referencia en el presente documento en general se refiere al momento de cabeceo inducido aerodinámicamente del rotor 18. Por ejemplo, en un modo de realización, el momento de cabeceo medido es igual al momento de cabeceo que proporciona 0 kNm cuando la velocidad del viento es de 0 metros/segundo.

- 25 **[0039]** En el modo de realización ilustrado, el momento de voladizo de la ecuación (4) y el momento de orientación medido de la ecuación (5) se pueden determinar a partir del uno o más sensores 48, 50. Más específicamente, en un modo de realización particular, los sensores 48, 50 pueden ser dispositivos de medición de sonda de proximidad.

- 30 **[0040]** Una vez que el procesador 58 resuelve las ecuaciones 3-5 para las tres incógnitas, a saber, las fuerzas F_1 , F_2 , F_3 , el procesador 58 está configurado para determinar el momento de flexión fuera de plano para cada una de las palas de rotor 22. Más específicamente, en un modo de realización, el procesador 58 calcula el momento de flexión de raíz de pala fuera de plano usando la ecuación (6) a continuación:

$$\text{Momento de flexión fuera de plano} = F * \text{PuntoAplicaciónFP} * \text{Radio de pala} - CObuje$$

Ecuación

(6)

40 donde

F es igual a la fuerza correspondiente que actúa sobre la pala de rotor, por ejemplo, F_1 , F_2 o F_3 .

- 45 **[0041]** Como se ha mencionado, el procesador 58 también está configurado para estimar un momento de raíz de pala en plano de la pala de rotor 22. Más específicamente, en un modo de realización particular, el procesador 58 está configurado para estimar el momento de raíz de pala en plano de la pala de rotor 22 en función de al menos uno de un peso de la pala de rotor 22, una carga de par mecánico de la pala de rotor y/o una carga de inercia de la pala de rotor 22. Por ejemplo, el procesador 58 puede calcular el peso de la pala de rotor 22 en función de al menos uno del ángulo de azimut de rotor, una masa de pala de rotor, una gravedad,

un radio de buje o una ubicación de centro de gravedad de la pala de rotor, como se muestra en la ecuación (7) a continuación:

$$\text{Carga de peso de pala} = -\sin(\theta) * \text{MasaPala} * \text{Gravedad} * (\text{CG}_{\text{ub}} - \text{CO}_{\text{buj e}})$$

Ecuación (7)

[0042] En otro modo de realización, el procesador 58 está configurado para calcular la carga de par mecánico de la pala de rotor 22 en función de al menos uno de un par de torsión del eje de baja velocidad, un radio de pala o el radio de buje, como se muestra en la ecuación (8) a continuación:

$$\text{Carga de par mecánico} = \frac{\text{Par de torsión}}{\text{Npalas}} * \frac{(\text{RadioPala} - \text{CO}_{\text{buj e}})}{\text{RadioPala}}$$

Ecuación (8)

[0043] En otro modo de realización más, el procesador 58 está configurado para calcular la carga de inercia de la pala de rotor 22 en función de al menos una de una aceleración de rotor o una inercia de rotor, como se muestra en la ecuación (9) a continuación:

$$\text{Carga de inercia} = \text{AceleraciónRotor}_{\text{filtrada}} * \frac{\text{InerciaRotor}}{\text{Npalas}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

[0044] En diversos modos de realización, cada pala de rotor 22 contribuye de igual forma en la aceleración del rotor. Por tanto, en determinados modos de realización, las cargas aerodinámicas en plano son iguales en todas las palas de rotor 22 y solo cambian tan rápido como el par mecánico. La carga de inercia en plano de la aceleración del rotor es importante para la carga en plano global. Por tanto, para reflejar este efecto, el procesador 58 puede determinar la aceleración del rotor en base al menos parcialmente a una velocidad de cambio de una señal de velocidad de rotor y filtrando la señal de velocidad. Más específicamente, en un modo de realización, el procesador 58 puede filtrar la señal de velocidad por medio de un filtro de paso bajo. Así pues, el filtro de paso bajo puede dejar pasar señales de baja frecuencia pero atenuar (es decir, reducir la amplitud de) señales con frecuencias superiores a una frecuencia de corte. Las señales de baja frecuencia se pueden restar a continuación de la señal no procesada de modo que solo queden las señales de alta frecuencia. En otros modos de realización, el filtro de paso bajo se puede usar junto con un filtro de paso alto. Además, se puede usar cualquier número de filtros de paso bajo o filtros de paso alto de acuerdo con la presente divulgación. De forma alternativa, el procesador 58 puede filtrar la señal de velocidad por medio de un filtro de paso alto. Así pues, el filtro de paso alto puede dejar pasar señales de alta frecuencia pero atenuar señales con frecuencias inferiores a una frecuencia de corte.

[0045] Después de calcular la carga de peso de pala, la carga de par mecánico y la carga de inercia de la pala de rotor 22, el momento de flexión de raíz de pala en plano se puede calcular usando la ecuación (10) a continuación:

$$\text{Momento de flexión en plano} = \text{Carga de peso de pala} + \text{Carga de par mecánico} + \text{Carga de inercia}$$

Ecuación (10)

[0046] Como se ha mencionado, el procesador 58 también puede estar configurado para determinar otros componentes de carga de pala además del momento de raíz de pala fuera de plano y el momento de raíz de pala en plano, por ejemplo, fuerzas axiales de pala, fuerzas de cizalladura fuera de plano, fuerzas de cizalladura en plano y/o torsión de pala. En determinados modos de realización, dichos componentes de carga pueden tener un impacto menor en el estado de carga de raíz de pala global y se pueden omitir.

[0047] Más específicamente, en un modo de realización, el procesador 58 está configurado para calcular la fuerza axial de la pala de cada pala de rotor 22 en función de al menos una de una masa de pala de rotor, una velocidad de viento, una ubicación de centro de gravedad, una gravedad y/o el ángulo de azimut del rotor. Por tanto, en otros modos de realización, el procesador 58 también puede calcular la fuerza de cizallamiento fuera de plano para cada pala de rotor 22 en función de al menos la carga axial de la pala de rotor y los ángulos de conicidad e inclinación. En modos de realización adicionales, el procesador 58 está configurado para calcular la fuerza de cizalladura en plano de cada pala de rotor 22 en función de al menos uno del ángulo de azimut de

rotor, la masa de pala de rotor, el radio de pala, el PuntoAplicaciónEP, el par de torsión, la aceleración de rotor filtrada, la inercia de rotor, la gravedad, la resistencia aerodinámica, la velocidad del viento y/o la ubicación del centro de gravedad. Por ejemplo, en un modo de realización, la fuerza de cizalladura en plano para cada pala de rotor 22 se puede calcular usando la ecuación (11) a continuación:

5 Fuerza de cizalladura en plano

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{sen}(\theta) * \text{MasaPala} * \text{Gravedad}}{\text{Resistencia} * \text{Velocidad de viento}} \\
 &+ \frac{\text{PuntoAplicaciónEP} * \text{RadioPala}}{\text{PuntoAplicaciónEP} * \text{RadioPala}} \\
 &- \frac{\frac{\text{Par de torsión}}{\text{Npalas}}}{\text{PuntoAplicaciónEP} * \text{RadioPala}} + \frac{\frac{\text{CTAcRotor} * \text{InerciaRotor}}{\text{Npalas}}}{\text{UbCG}}
 \end{aligned}$$

Ecuación (11)

donde

10 CTAcRotor es la constante de tiempo de filtro de paso bajo de primer orden para la señal de aceleración del rotor y se puede establecer en base a la calidad de la señal de medición de velocidad.

15 **[0048]** Después de calcular los componentes de carga de la pala individuales, el procesador 58 está configurado para calcular el momento resultante de raíz de pala global de la pala de rotor 22 en base al menos parcialmente al momento de flexión de raíz de pala fuera de plano y el momento de flexión de raíz de pala en plano. Por ejemplo, en un modo de realización, el momento resultante de raíz de pala global se puede calcular usando la ecuación (12) a continuación:

Momento resultante de encastramiento de pala

$$= \sqrt{\text{Momento de flexión fuera de plano}^2 + \text{Momento de flexión en plano}^2}$$

Ecuación (12)

20 **[0049]** En referencia ahora a las FIGS. 7-10, se ilustran diversos gráficos que ilustran la exactitud de la presente divulgación en comparación con unos datos medidos y/o unos procedimientos de estimación de carga previos. Más específicamente, como se muestra en la FIG. 7, se ilustra un gráfico 100 de un modo de realización del momento resultante de raíz de pala estimado 102 calculado mediante la presente divulgación y el momento resultante de raíz de pala medido 104 en función del tiempo. Como se muestra, la estrecha correlación entre el momento resultante de raíz de pala estimado 102 y el momento resultante de raíz de pala medido 104 ilustra la exactitud de la presente divulgación. Además, como se muestra en el gráfico 200 de la FIG. 8, los datos de la FIG. 7 se representan diferencialmente con el momento resultante de raíz de pala medido en el eje x y el momento resultante de raíz de pala estimado en el eje y. Como se muestra, la pendiente de los datos 202 es de aproximadamente uno para ilustrar más la exactitud del momento resultante de raíz de pala estimado de la presente divulgación.

30 **[0050]** Por el contrario, como se muestra en el gráfico 300 de la FIG. 9, el empuje estimado 302 calculado de acuerdo con unos procedimientos previos conocidos en la técnica está representado en relación con el momento resultante de raíz de pala medido 304. Como se muestra, el empuje estimado 302 está menos correlacionado con el momento resultante de raíz de pala medido 304 que los datos proporcionados en la FIG. 7. Además, como se muestra en el gráfico 400 de la FIG. 10, los datos 402 se representan con el momento resultante de raíz de pala medido en el eje x y el empuje estimado en el eje y. Como se muestra, los datos 402 están mucho menos correlacionados que el gráfico de la FIG. 8, que tiene una pendiente muy inferior a uno.

40 **[0051]** Debido a la exactitud del algoritmo para estimar el momento resultante de raíz de pala de la presente divulgación, el controlador 26 de la presente divulgación puede controlar con mayor exactitud las cargas de la turbina eólica 10 sin pérdidas indebidas en AEP. Por ejemplo, como se muestra en la FIG. 11, el procesador 58 está configurado para estimar el momento resultante de raíz de pala (por ejemplo, MrB) y luego determinar el error de MrB usando una variedad de procedimientos adecuados. Por ejemplo, en un modo de realización, el estimador de parámetros de turbina eólica 56 está configurado para calcular el error de MrB en base a la ecuación (13) a continuación:

$$\text{Error de MrB} = \max(\text{MrB}_{11}, \text{MrB}_{22}, \text{MrB}_{33}) - \text{LímiteMrB}$$

Ecuación (13)

50 donde

MrB_1 es el momento resultante de raíz de pala de una primera pala de rotor,

MrB_2 es el momento resultante de raíz de pala de una segunda pala de rotor,

5 MrB_3 es el momento resultante de raíz de pala de una tercera pala de rotor y

Límite MrB es el límite de momento resultante de raíz de pala que evita daños a los componentes de turbina.

10 **[0052]** En base al error, el controlador 26 puede determinar e implementar una acción de control necesaria para un error cero o cercano a cero. Por ejemplo, el controlador 26 puede calcular un ángulo de pitch para una o más de las palas de rotor 22 y aplicar la nueva restricción de pitch para alcanzar el error cero. Además, se debe entender que la acción de control como se describe en el presente documento puede abarcar cualquier mandato o restricción adecuada por parte del controlador 26. Por ejemplo, en varios modos de realización, la acción de control puede incluir reducir o aumentar temporalmente la potencia nominal de la turbina eólica para evitar cargas excesivas sobre uno o más de los componentes de turbina eólica. El aumento de potencia nominal de la turbina eólica, por ejemplo, mediante el aumento del par de torsión, puede ralentizar temporalmente la turbina eólica y actuar como freno para ayudar a reducir o impedir la carga. Reducir la potencia nominal de la turbina eólica puede incluir reducir la velocidad, reducir el par de torsión o una combinación de ambas cosas. Además, como se ha mencionado, la potencia nominal de la turbina eólica 10 se puede reducir pitchando una o más de las palas de rotor 22 alrededor de su eje de pitch 28. Más específicamente, el controlador 26 en general puede controlar cada mecanismo de ajuste de pitch 32 para alterar el ángulo de pitch de cada pala de rotor 22 entre 0 grados (es decir, una posición de potencia de la pala de rotor 22) y 90 grados (es decir, una posición de bandera de la pala de rotor 22). Así pues, en un modo de realización, el controlador 26 puede emitir una nueva consigna (por ejemplo, de 0 grados a 5 grados), mientras que en otro modo de realización, el controlador 26 puede especificar una nueva restricción de pitch (por ejemplo, una restricción para asegurar que los posteriores mandatos de pitch sean al menos de 5 grados).

30 **[0053]** En otro modo de realización más, la potencia nominal de la turbina eólica 10 se puede reducir temporalmente modificando la demanda de par de torsión en el generador 24. En general, la demanda de par de torsión se puede modificar usando cualquier procedimiento, proceso, estructura y/o medios adecuados conocidos en la técnica. Por ejemplo, en un modo de realización, la demanda de par de torsión en el generador 24 se puede controlar usando el controlador 26 y transmitiendo una señal/un mandato de control adecuado al generador 24 para modular el flujo magnético producido dentro del generador 24.

35 **[0054]** La potencia nominal de la turbina eólica 10 también se puede reducir temporalmente orientando la góndola 22 para cambiar el ángulo de la góndola 16 en relación con la dirección del viento. En otros modos de realización, el controlador 26 puede estar configurado para accionar uno o más frenos mecánicos para reducir la velocidad de rotación de las palas de rotor 22, reduciendo de este modo la carga de componente. En otros modos de realización más, el controlador 26 puede estar configurado para realizar cualquier acción de control apropiada conocida en la técnica. Además, el controlador 26 puede implementar una combinación de dos o más acciones de control.

45 **[0055]** En referencia ahora a la FIG. 12, se ilustra un diagrama de flujo del procedimiento 500 de acuerdo con un modo de realización de la presente divulgación. Como se muestra, el procedimiento 500 incluye una primera etapa 502 de medición de una pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica. Otra etapa 504 incluye estimar una fuerza fuera de plano que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente a la pluralidad de parámetros operativos. El procedimiento 500 también incluye una etapa 506 de determinar un punto de aplicación de la fuerza fuera de plano a lo largo de un tramo de la pala de rotor. Otra etapa 508 incluye estimar un momento fuera de plano de la pala de rotor en base al menos parcialmente a la fuerza fuera de plano y el punto de aplicación. Otra etapa 510 incluye estimar un momento de pala en plano de la pala de rotor. El procedimiento 500 puede incluir a continuación una etapa 512 de calcular la carga que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente al momento fuera de plano y el momento en plano.

55 **[0056]** En esta descripción escrita se usan ejemplos para divulgar la invención, incluyendo el mejor modo, y también para permitir que cualquier experto en la técnica lleve a la práctica la invención, incluyendo la fabricación y el uso de cualquier dispositivo o sistema y la realización de cualquier procedimiento incorporado. El alcance patentable de la invención está definido por las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento (500) para estimar una carga que actúa sobre una pala de rotor (22) de una turbina eólica (10) y para hacer funcionar la turbina eólica, comprendiendo el procedimiento:
 - medir (502), por medio de uno o más sensores (48, 50), una pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica,
 - estimar (504), por medio de un procesador (58) de un controlador (26) de la turbina eólica, una fuerza fuera de plano y en plano que actúa sobre la pala de rotor (22) en base al menos parcialmente a la pluralidad de parámetros operativos;
 - determinar (506), por medio del controlador (26), un punto de aplicación de la fuerza fuera de plano y en plano en un tramo de la pala de rotor en función de una ratio de velocidad de punta y un ángulo de pitch de la pala de rotor (22);
 - estimar (508), por medio del controlador (26), un momento fuera de plano de la pala de rotor en base al menos parcialmente a la fuerza fuera de plano y el punto de aplicación fuera de plano;
 - estimar (510), por medio del controlador (26), un momento de pala en plano de la pala de rotor en base al menos parcialmente a la fuerza en plano y el punto de aplicación en plano;
 - calcular (512), por medio del controlador (26), la carga que actúa sobre la pala de rotor en base al menos parcialmente al momento fuera de plano y el momento en plano; e
 - implementar, por medio del controlador (26), una acción de control en base a la carga calculada, comprendiendo la acción de control al menos una de pitchear la pala de rotor, orientar una góndola de la turbina eólica, reducir la potencia nominal de la turbina eólica, o aumentar la potencia nominal de la turbina eólica.
2. El procedimiento (500) de la reivindicación 1, en el que la carga que actúa sobre la pala de rotor (22) corresponde a un momento resultante de raíz de pala.
3. El procedimiento (500) de la reivindicación 1, en el que la pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica (10) comprende al menos uno de los siguientes: un empuje, una potencia, una velocidad, un par de torsión, un ángulo de pitch, un momento de cabeceo, un momento de voladizo, un ángulo de azimut de rotor, o un momento de orientación.
4. El procedimiento (500) de la reivindicación 3, que comprende además estimar el empuje utilizando al menos uno de los siguientes: una pluralidad de ecuaciones, uno o más mapas de rendimiento aerodinámico, o una o más tablas de consulta.
5. El procedimiento (500) de la reivindicación 1, en el que estimar la fuerza fuera de plano comprende además:
 - determinar una distribución de fuerza fuera de plano desde una raíz de pala hasta una punta de pala de la pala de rotor (22); e
 - integrar la distribución de fuerza fuera de plano para obtener una fuerza fuera de plano equivalente.
6. El procedimiento (500) de la reivindicación 1, en el que determinar el punto de aplicación de la fuerza fuera de plano comprende además:
 - determinar una pluralidad de puntos de aplicación de una pluralidad de fuerzas fuera de plano en funcionamiento de la turbina eólica (10) para una pluralidad de velocidades de viento; y
 - almacenar la pluralidad de puntos de aplicación en un mapa de rendimiento aerodinámico.
7. El procedimiento (500) de la reivindicación 3, que comprende además estimar el momento en plano de la pala de rotor (22) en función de al menos uno de un peso de la pala de rotor, una carga de par mecánico de la pala de rotor, una velocidad de la pala de rotor, una potencia de la pala de rotor, o una carga de inercia de la pala de rotor.
8. El procedimiento (500) de la reivindicación 7, que comprende además calcular la carga de gravedad de la pala de rotor (22) en función de al menos uno del ángulo de azimut de rotor, una masa de la pala de rotor, una gravedad, un radio de buje, o una ubicación de centro de gravedad de la pala de rotor.

9. El procedimiento (500) de la reivindicación 8, que comprende además calcular la carga de par mecánico de la pala de rotor (22) en función de al menos uno de un par de torsión de eje de baja velocidad, un radio de pala, o el radio de buje.
- 5 10. El procedimiento (500) de la reivindicación 9, que comprende además calcular la carga de inercia de la pala de rotor (22) en función de al menos una de una aceleración de rotor o una inercia de rotor.
- 10 11. El procedimiento (500) de la reivindicación 10, que comprende además determinar la aceleración de rotor en base al menos parcialmente a una velocidad de cambio de una señal de velocidad de rotor y filtrar la señal de velocidad por medio de un filtro de paso bajo.
12. El procedimiento (500) de la reivindicación 3, que comprende además:
- 15 - estimar una fuerza de cizalladura en plano de la pala de rotor (22) en función de al menos uno del ángulo de azimut de rotor, una masa de pala de rotor, un radio de pala de rotor, el punto de aplicación, un par de torsión, una aceleración de rotor filtrada, una inercia de rotor, una gravedad, una resistencia aerodinámica, una velocidad de viento, o una ubicación de centro de gravedad; y
- 20 - calcular la carga que actúa sobre la pala de rotor (22) en base al menos parcialmente a la fuerza de cizalladura en plano.
13. Un sistema para mantener unas cargas de pala de rotor de una turbina eólica (10) dentro de límites predeterminados mientras también se aumenta al máximo una salida de potencia, comprendiendo el sistema:
- 25 - uno o más sensores (48, 50) configurados para medir una pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica (10);
- 30 - un controlador (26) configurado con el uno o más sensores, comprendiendo el controlador (26) un procesador (58) configurado para realizar una o más operaciones, comprendiendo las operaciones:
- 35 - estimar (504) una fuerza fuera de plano y en plano que actúa sobre la pala de rotor (22) en base al menos parcialmente a la pluralidad de parámetros operativos;
- 40 - determinar (506) un punto de aplicación de la fuerza fuera de plano y en plano en un tramo de la pala de rotor (22) en función de una ratio de velocidad de punta y un ángulo de pitch de la pala de rotor (22);
- estimar (508) un momento fuera de plano de la pala de rotor (22) en base al menos parcialmente a la fuerza fuera de plano y el punto de aplicación fuera de plano;
- 45 - estimar (510) un momento de pala en plano de la pala de rotor (22) en base al menos parcialmente a la fuerza en plano y el punto de aplicación en plano;
- calcular (512) la carga que actúa sobre la pala de rotor (22) en base al menos parcialmente al momento fuera de plano y al momento en plano; e
- 50 - implementar una acción de control en base a la carga calculada, comprendiendo la acción de control al menos una de pitchear la pala de rotor, orientar una góndola de la turbina eólica, reducir la potencia nominal de la turbina eólica, o aumentar la potencia nominal de la turbina eólica.
- 55 14. El sistema de la reivindicación 13, en el que la pluralidad de parámetros operativos de la turbina eólica (10) comprende al menos uno de los siguientes: un empuje, una potencia, una velocidad, un par de torsión, un ángulo de pitch, un momento de cabeceo, un momento de voladizo, un ángulo de azimut de rotor o un momento de orientación.

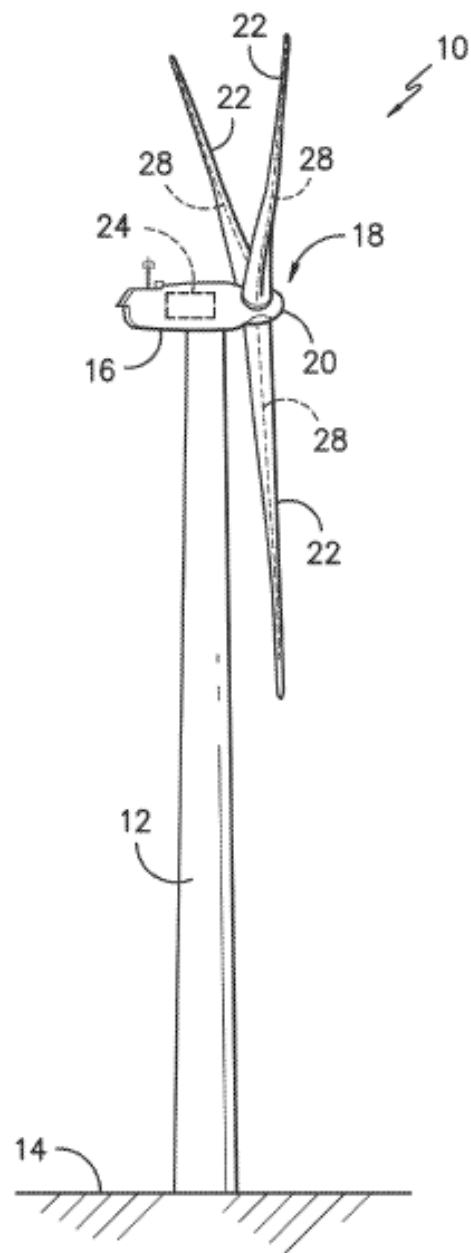


FIG. -1-

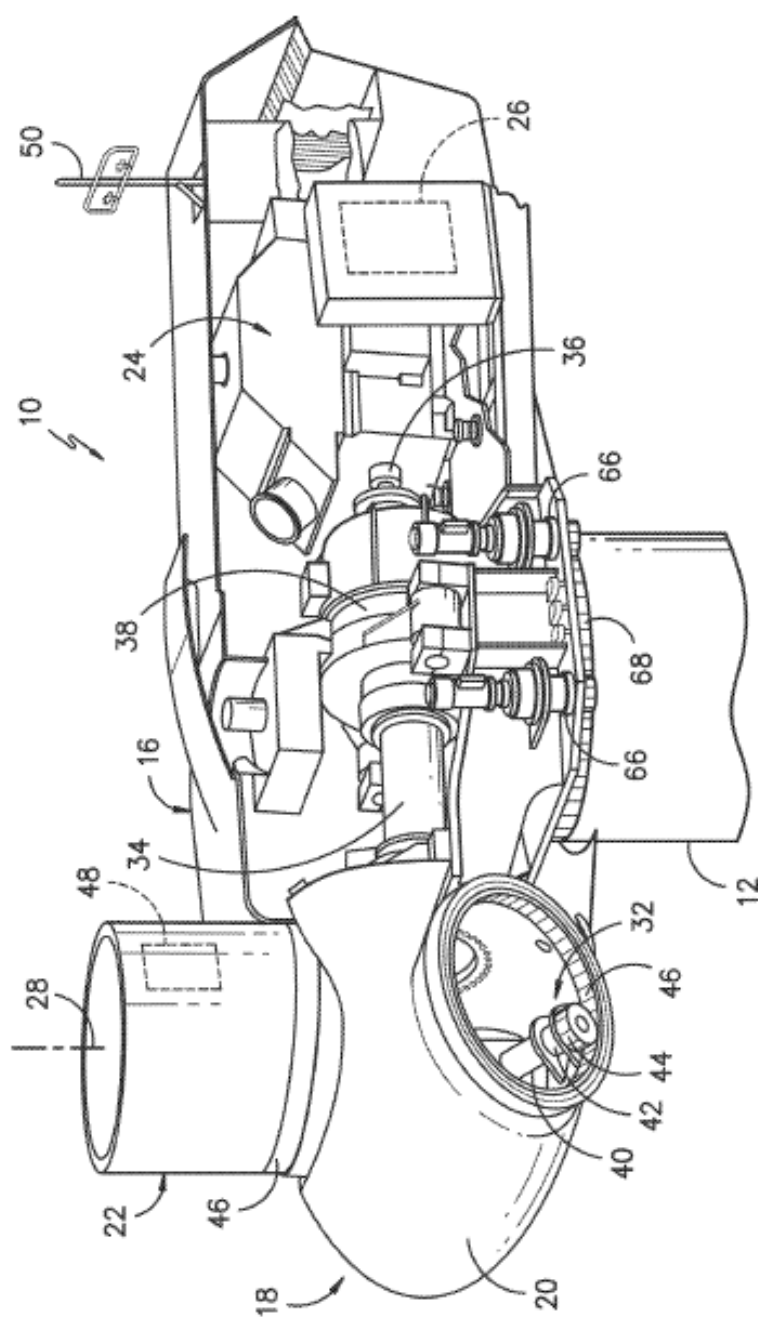


FIG. -2-

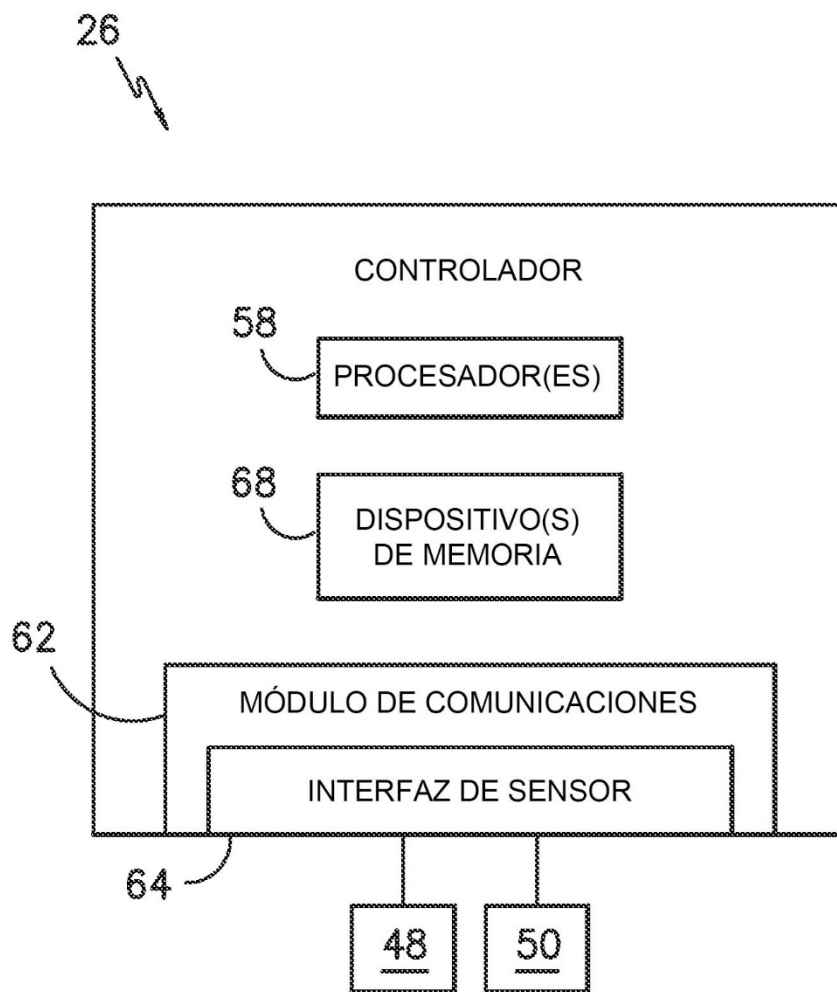


FIG. -3-

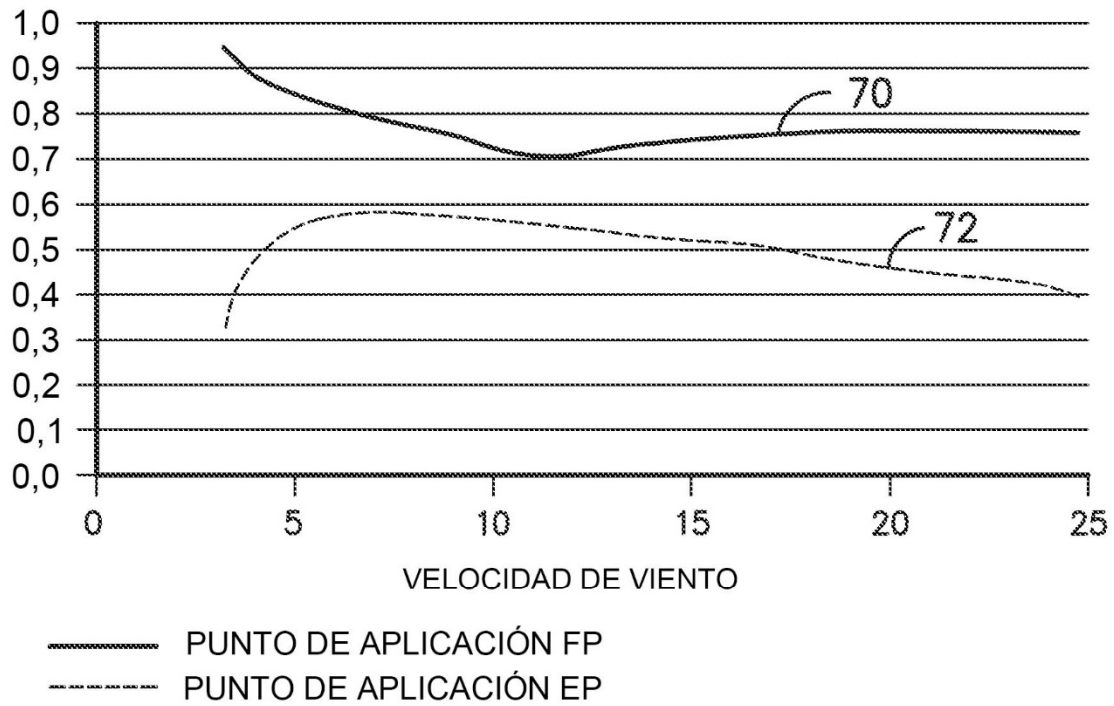


FIG. -4-

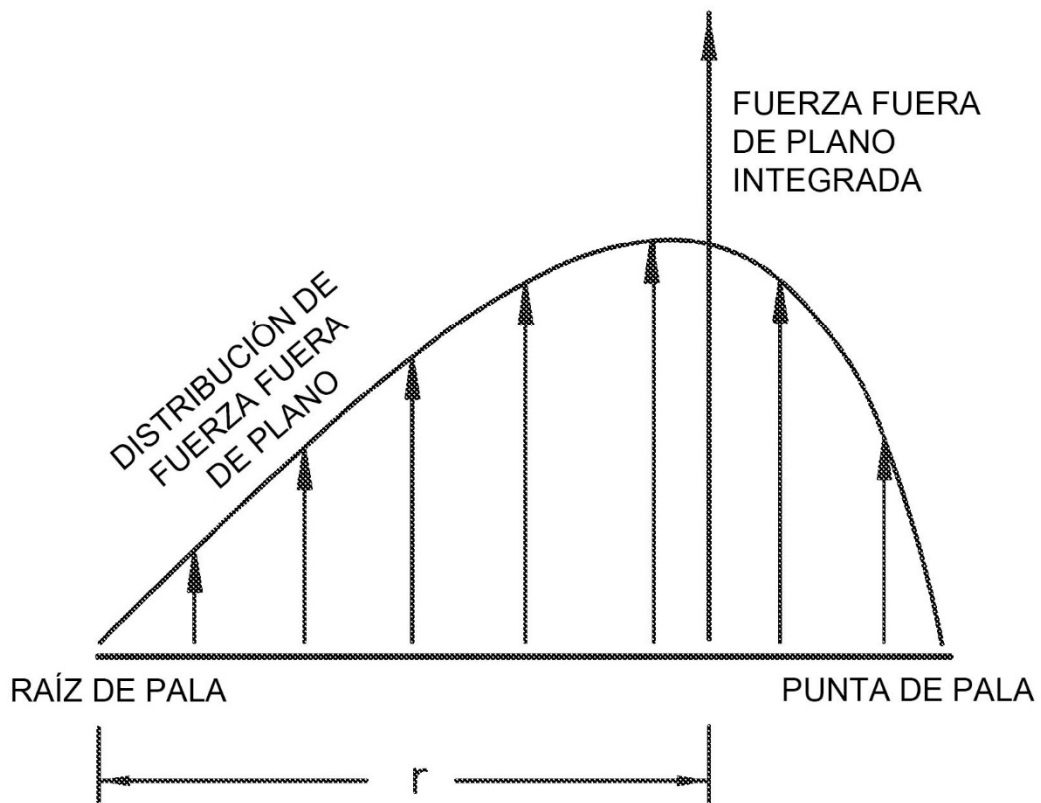


FIG. -5-

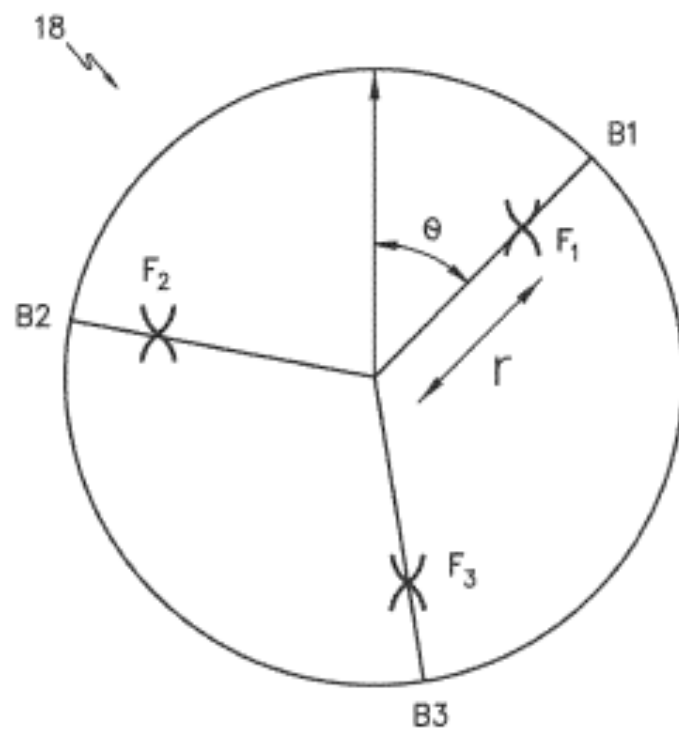


FIG. -6-

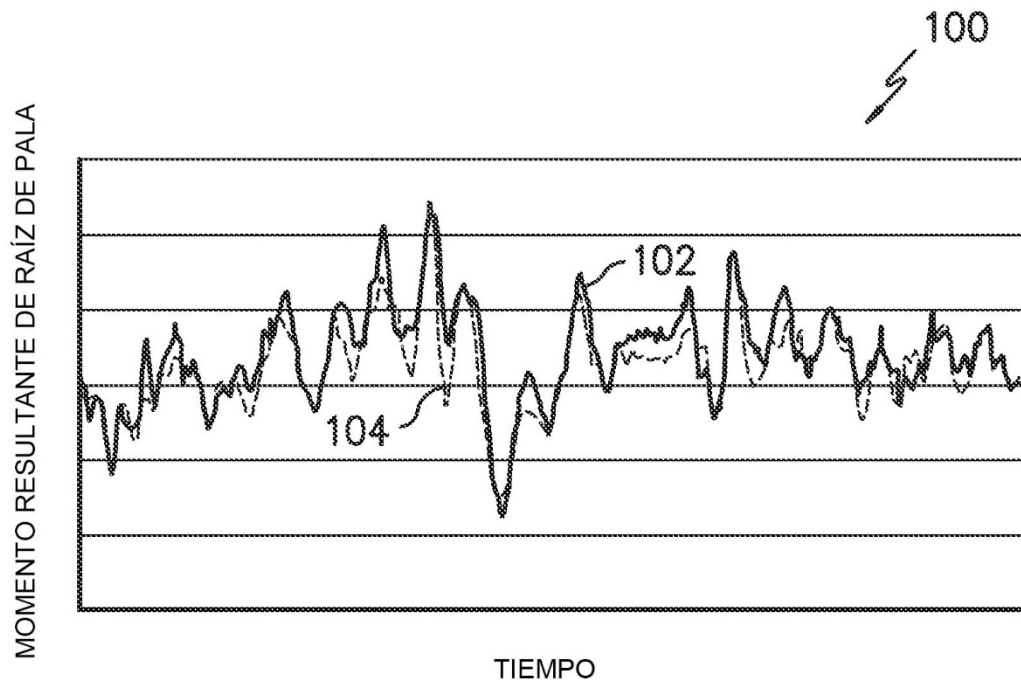


FIG. -7-

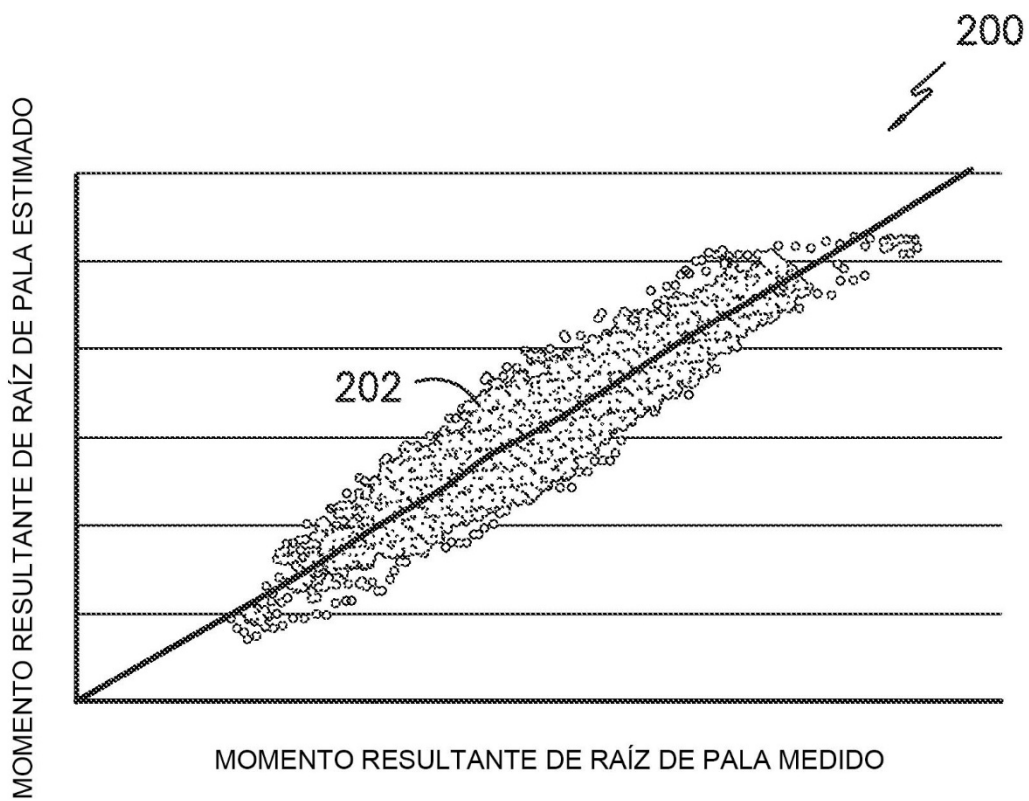


FIG. -8-

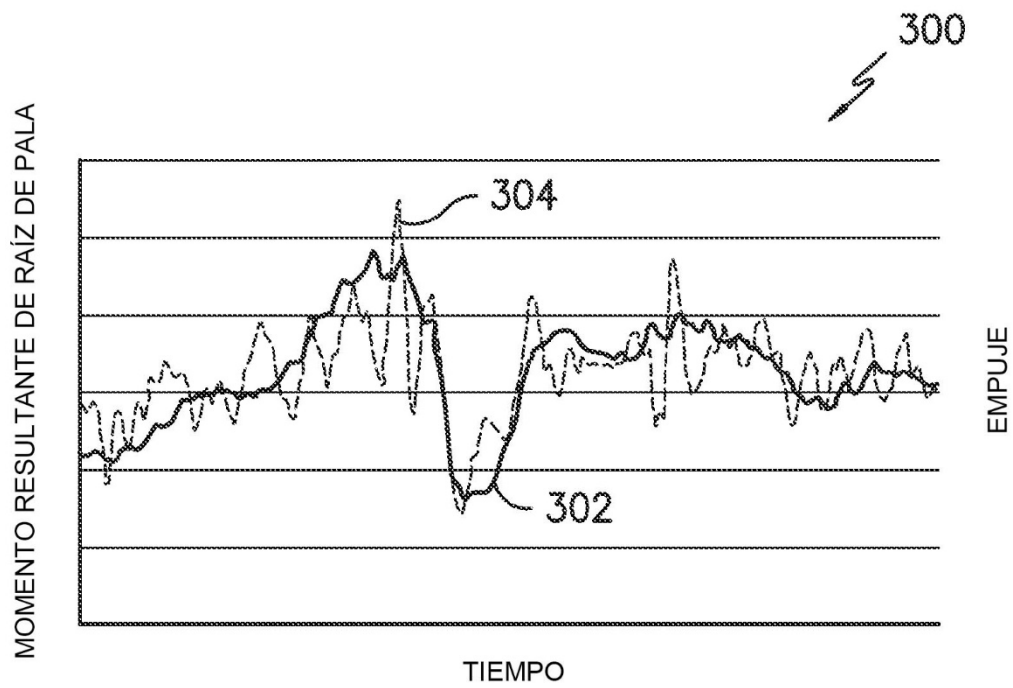


FIG. -9-

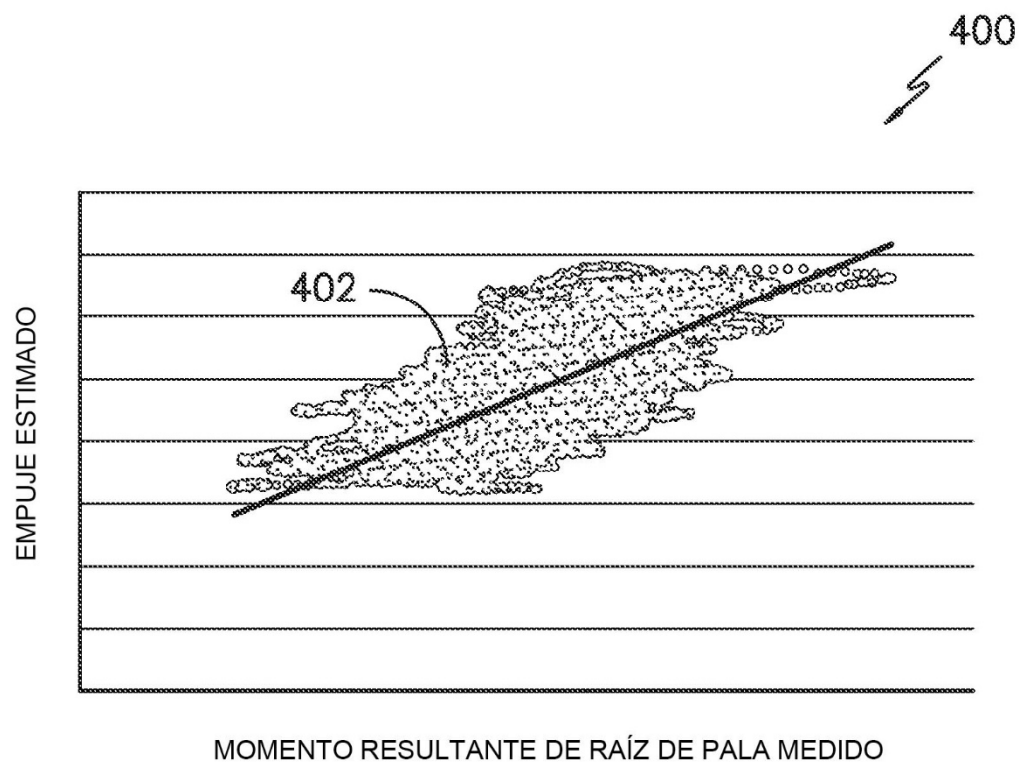


FIG. -10-

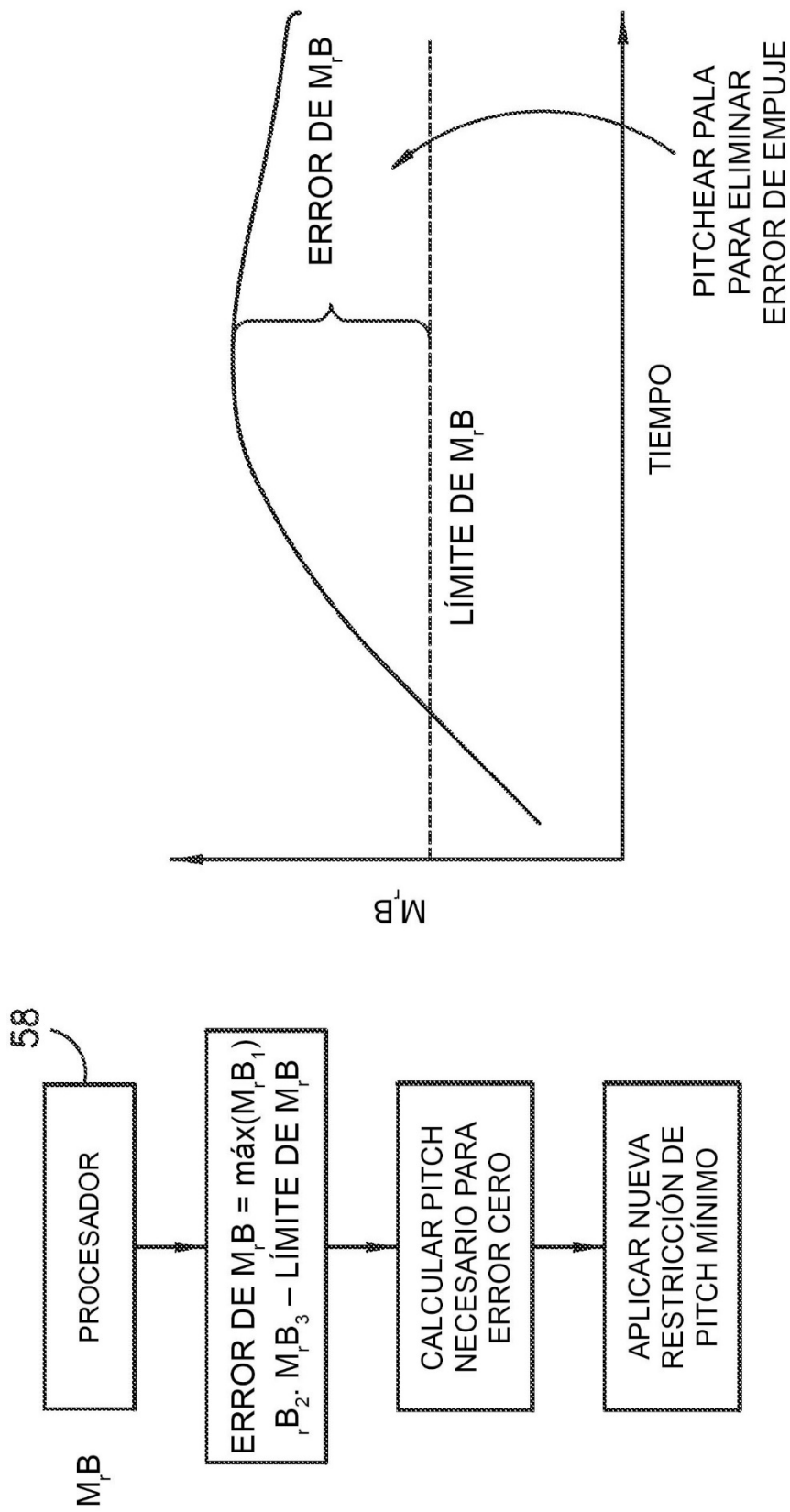


FIG. -II-

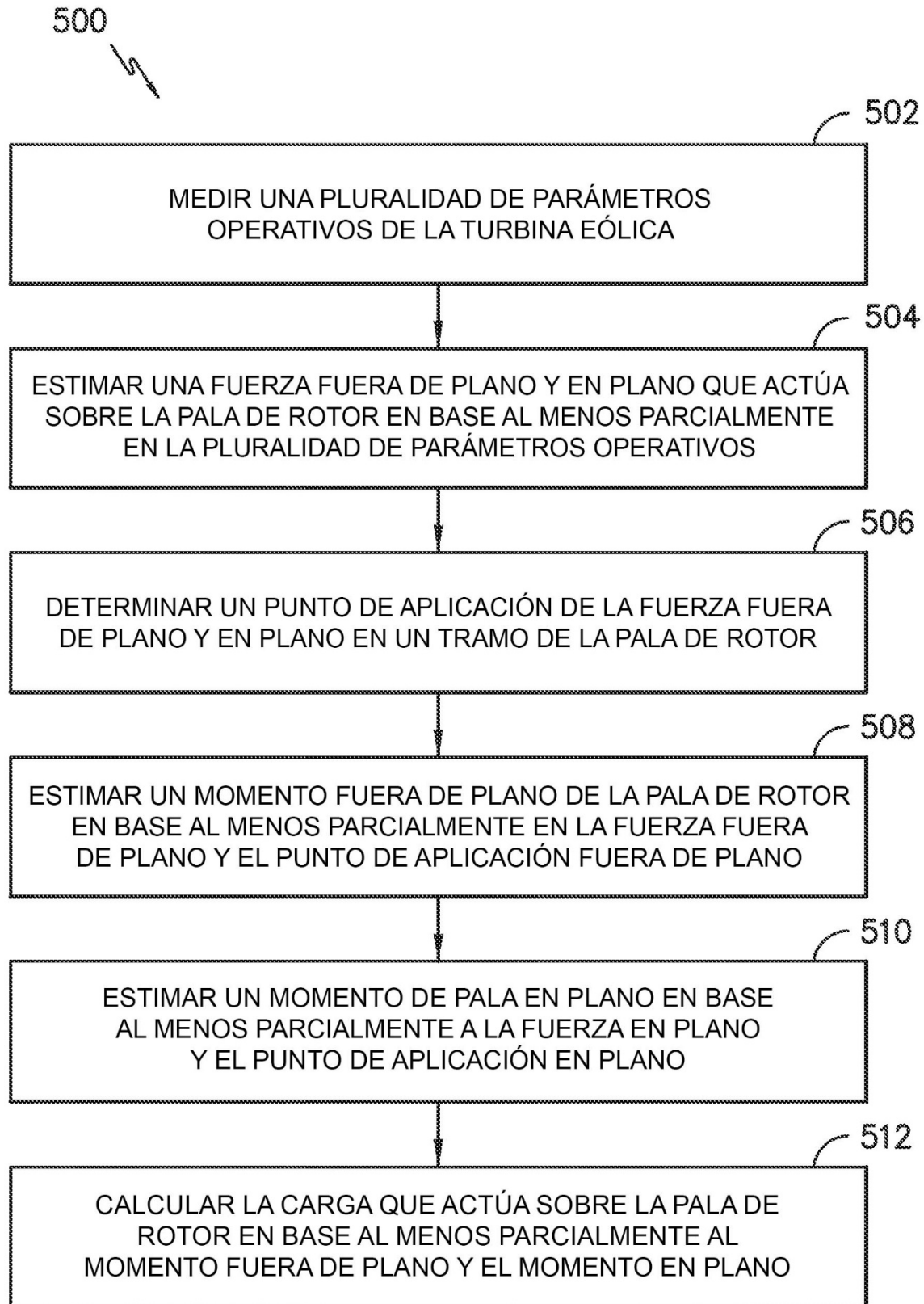


FIG. -12-