

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 756 024**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.10.2015** E 15191328 (2)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.09.2019** EP 3015705

54 Título: **Sistema y procedimiento para control adaptativo de desequilibrio de rotor**

30 Prioridad:

27.10.2014 US 201414524229

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

24.04.2020

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**MARWAHA, MONIKA;
GERBER, BRANDON SHANE;
GHANDI, JIGNESH GOVINDLAL;
CARDINAL, MARK EDWARD y
PERLEY, THOMAS FRANKLIN**

74 Agente/Representante:

CONTRERAS PÉREZ, Yahel

ES 2 756 024 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 control adaptativo de desequilibrio de rotor

5 La descripción se refiere, en general, a un aerogenerador y, más específicamente, a un sistema y un procedimiento para regular la corrección de un punto de ajuste de un momento del eje en base a las condiciones ambientales que resultan en un desequilibrio de cargas de un aerogenerador.

10 Los aerogeneradores modernos funcionan en una amplia gama de condiciones de viento. Estas condiciones de viento pueden dividirse ampliamente en dos categorías, por debajo de las velocidades nominales y por encima de las velocidades nominales. Para producir energía en estas condiciones de viento, los aerogeneradores pueden incluir sistemas de control sofisticados tales como controladores de cabeceo y controladores de par. Estos controladores tienen en cuenta los cambios en las condiciones del viento y los cambios acompañantes en la dinámica del aerogenerador. Por ejemplo, los controladores de cabeceo (o sistemas de cabeceo) generalmente varían el ángulo de inclinación de las palas del rotor para tener en cuenta (o adaptarse a) los cambios en las condiciones del viento y la dinámica de la turbina. Durante velocidades de viento inferiores a la nominal, la energía eólica puede ser inferior a la potencia nominal del aerogenerador. En esta situación, el controlador de cabeceo puede intentar maximizar la potencia de salida inclinando las palas del rotor sustancialmente perpendiculares a la dirección del viento. Alternativamente, durante las velocidades de viento por encima de la nominal, la energía eólica puede ser mayor que la potencia de salida nominal del aerogenerador. Por lo tanto, en este caso, el controlador de cabeceo puede restringir la conversión de energía eólica inclinando las palas del rotor de manera que sólo parte de la energía eólica incida en las palas del rotor. Controlando el ángulo de inclinación, el controlador/sistema de cabeceo controla la velocidad de las palas del rotor y, a su vez, la energía generada por el aerogenerador.

25 Además de mantener la velocidad del rotor, también pueden emplearse controladores de cabeceo para reducir las oscilaciones de la torre. Las oscilaciones o vibraciones de la torre se producen debido a diversas perturbaciones, tales como turbulencia, amortiguación ineficiente, o transición entre las dos condiciones del viento. Además, la torre puede vibrar a lo largo de cualquier grado de libertad. Por ejemplo, la torre puede vibrar en una dirección longitudinal (comúnmente conocido como cabeceo de la torre), en una dirección de lado a lado (comúnmente denominado "movimiento hacia los lados" de la torre), o a lo largo de su eje longitudinal (comúnmente denominado vibración torsional). Véase, por ejemplo, WO 2010/016764, WO 2008/041066, EP 1 612 413 y EP 2 060 785.

35 El movimiento oscilante de la torre generalmente está causado por el empuje aerodinámico y el giro de las palas del rotor. Cada vez que una pala del rotor pasa por delante de la torre, el empuje del viento que incide sobre la torre disminuye. Tal variación continua en la fuerza del viento puede inducir oscilaciones en la torre. Además, si la velocidad del rotor es tal que una pala del rotor pasa sobre la torre cada vez que la torre se encuentra en una de sus posiciones extremas (hacia adelante o hacia atrás), las oscilaciones de la torre pueden amplificarse. Típicamente, las oscilaciones en la dirección longitudinal se minimizan automáticamente debido a la amortiguación aerodinámica. La amortiguación aerodinámica se basa en el hecho de que la parte superior de la torre oscila constantemente en la dirección longitudinal. Cuando la parte superior de la torre se mueve a barlovento (o hacia adelante), aumenta el empuje del rotor. Este aumento en el empuje del rotor empuja la torre hacia atrás a sotavento. El empuje a sotavento, a su vez, ayuda a amortiguar las oscilaciones de la torre. De manera similar, cuando la parte superior de la torre se mueve a sotavento, el empuje del rotor puede disminuir. Esta disminución en el empuje del rotor empuja la torre hacia atrás a barlovento. El empuje a barlovento también ayuda a amortiguar las oscilaciones de la torre.

45 Típicamente, el controlador de cabeceo utiliza dos bucles de control separados para las dos funciones, controlando la velocidad del rotor y reduciendo las oscilaciones de la torre. Se emplea un bucle de control de velocidad del rotor para determinar un ángulo de inclinación para controlar la velocidad del rotor y se utiliza un bucle de control de amortiguación de la torre para calcular un ángulo de inclinación para reducir las oscilaciones de la torre. A menudo, estos bucles de retroalimentación operan de una manera relativamente independientes entre sí. Por ejemplo, el bucle de control de velocidad del rotor puede determinar el ángulo de inclinación en base a la velocidad del rotor, la velocidad del viento, y el ángulo de inclinación actual. El bucle de control de amortiguación de la torre, por otra parte, puede determinar el ángulo de inclinación en base a la desviación de la torre, la velocidad superior de la torre, la aceleración superior de la torre, el ángulo de inclinación actual, y la velocidad del viento. Debido a esta independencia, los bucles de control de velocidad del rotor disponibles actualmente pueden calcular un ángulo de inclinación para mantener la velocidad del rotor que puede inducir desventajosamente oscilaciones de la torre en lugar de reducirlas. Además, estos bucles de control de velocidad del rotor pueden causar una amplificación de energía en el rotor cerca de las frecuencias de resonancia de la torre. Dicha amplificación puede aumentar oscilaciones en la torre y aumentar la carga de fatiga situada sobre el aerogenerador. Con el tiempo, tales cargas de fatiga pueden reducir la vida de las piezas de los aerogeneradores y aumentar los costes asociados a los aerogeneradores.

- La gravedad tiende a doblar el rotor hacia abajo. La cizalladura positiva del viento tiende a doblar el rotor hacia arriba, y generalmente está presente (fatiga de ciclo elevada) y aumenta al aumentar la velocidad del viento. En algunos puntos operativos, la cizalladura del viento puede igualar la fuerza gravitacional, pero es de sentido opuesto y cancela el momento flector de la gravedad si no se corrige. El componente de empuje también ayuda a combatir la carga de gravedad, ya que muchos aerogeneradores tienen un ángulo de inclinación del rotor en la cabeza de la máquina, el rotor intenta naturalmente levantar el rotor y este momento de flexión también aumenta con la velocidad del viento. El momento flector se determina fácilmente debido a la geometría del sistema y la estimación del empuje. El momento flector puede explicarse cuando se identifica la cantidad de carga de corte. Para condiciones "estándar" (cizalladura del viento positiva), el momento debido a la cizalladura del viento y el empuje/cabeceo son complementarios y se oponen a la gravedad. Hay algunas condiciones de "cizalladura negativa" que se combina con la velocidad del viento correcta de modo que se obtiene una carga aerodinámica equilibrada en que el momento de cizalladura del viento hacia abajo es igual y opuesto al momento de empuje/cabeceo hacia arriba, de modo que todo queda en el momento debido a gravedad (probablemente visto solo raramente).
- La cizalla aplica fuerzas a las palas y al buje, y la cizalla positiva esencialmente transfiere fuerzas de flexión de las palas al buje y al eje. La cizalladura del viento aplica una carga asimétrica a través del rotor que resulta en un momento de flexión que se transfiere al buje/eje. Una cizalladura positiva crea un momento de flexión hacia arriba y se opone a la gravedad, mientras que una cizalladura negativa crea un momento hacia abajo y complementa la gravedad. Existe un límite en la cantidad de cabeceo que la turbina puede realizar para superar las fuerzas de las palas/buje o para compensar la gravedad. Si el controlador de cizalladura se encuentra en un límite, tampoco puede responder a un estado estable o dinámico adicional (cambios relativamente rápidos en cizalladura). Poder ajustarse a condiciones dinámicas puede reducir la fatiga y otras tensiones dinámicas en el eje y el conjunto palas/buje. Dado que el sistema de cabeceo tiene capacidades limitadas, poder equilibrar la cantidad de compensación que se realiza tanto por gravedad como por cizalladura mantiene un equilibrio entre la demanda del sistema de cabeceo y la fatiga de la máquina y garantiza que el aerogenerador siempre se encuentra funcionando dentro de una zona objetivo (hasta que el entorno exija más de lo que la máquina puede manejar) a la vez que construye un equilibrio entre la cantidad de ancho de banda que se utiliza para las partes de compensación de estado estable frente a dinámico.
- Las limitaciones de las cargas de desequilibrio, tales como condiciones ambientales, incluyendo cizalladura, gravedad, turbulencia, desalineaciones del viento, etc., provocan un desequilibrio del rotor inducido por el medio ambiente. Otras formas de desequilibrio del rotor son auto-inducidas debido a variación de control, fabricación e instalación.
- Por consiguiente, se propone la presente invención, tal como se define por las reivindicaciones adjuntas.
- Diversas características, aspectos y ventajas de la presente invención se entenderán mejor al leer la siguiente descripción detallada con referencia a los dibujos adjuntos en los que símbolos similares representan partes similares en todos los dibujos, en los cuales:
- La figura 1 ilustra una vista en perspectiva de un aerogenerador, de acuerdo con aspectos de la presente descripción;
 - La figura 2 es una ilustración esquemática del aerogenerador de la figura 1 que representa la carga del rotor, de acuerdo con aspectos de la presente descripción;
 - La figura 3 es una ilustración esquemática del aerogenerador de la figura 1 que representa sensores de proximidad y una brida del eje principal, de acuerdo con aspectos de la presente descripción;
 - La figura 4 es un diagrama de bloques de un sistema de control en el aerogenerador de la figura 1, de acuerdo con aspectos de la presente descripción;
 - La figura 5 es un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para controlar el desequilibrio del rotor en el aerogenerador, de acuerdo con aspectos de la presente descripción;
 - La figura 6 ilustra un sistema de ecuaciones utilizado para ajustar el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje, de acuerdo con un aspecto de la presente descripción; y
 - La figura 7 ilustra un procedimiento para variar el punto de ajuste, de acuerdo con un aspecto de la presente descripción.
- Tal como se describirá en detalle a continuación, se presentan diversas realizaciones de un sistema y un procedimiento de control de un aerogenerador a modo de ejemplo para regular el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en un aerogenerador operativo. Al emplear los procedimientos y las diversas realizaciones del sistema de control del aerogenerador que se describen a continuación, el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje puede regularse en base a por lo menos uno de cizalladura del viento, velocidad del viento, y desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento. Además, el sistema de control del aerogenerador puede ayudar a reducir el desgaste de los componentes de control de cabeceo lo que, a su vez, reduce el coste de energía.

El cabeceo de las palas del rotor es deseable para cargas más bajas y una mayor producción de energía anual (AEP). Sin embargo, el control del desequilibrio del rotor está diseñado para seguir un valor fijo del punto de ajuste del momento del eje. Este valor se establece una vez y nunca varía. En realidad, este punto de ajuste no es óptimo para todos los valores de cizalladura del viento. A medida que varía la cizalladura del viento, el sistema de control de desequilibrio del rotor puede sobrepasar o activar los sistemas de cabeceo más de lo que necesitan activarse. Este uso excesivo del sistema de cabeceo puede causar un desgaste prematuro de los componentes del sistema de cabeceo (tal como, por ejemplo, motores de cabeceo, engranajes de cabeceo, etc.). De acuerdo con los aspectos de la presente descripción, se presenta un procedimiento y un sistema mejorados que varía el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a por lo menos uno de cizalladura del viento, velocidad del viento, y desequilibrio de cargas debido a cizalladura del viento, por lo que el sistema de cabeceo no se activa más de lo necesario para un entorno específico de cizalladura del viento. Variando la corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a valores específicos de cizalladura del viento, la activación del sistema de cabeceo se reducirá y el aerogenerador funcionará de manera más eficiente.

Volviendo ahora a los dibujos y haciendo referencia a la figura 1, se ilustra una vista en perspectiva parcial de un aerogenerador 100, de acuerdo con aspectos de la presente descripción. El aerogenerador 100 está configurado para convertir energía cinética del viento que pasa a través del aerogenerador 100 en energía eléctrica. En particular, el aerogenerador 100 incluye una pluralidad de partes móviles mecánicas que ayudan a convertir la energía cinética del viento en energía mecánica. La energía mecánica se utiliza, a su vez, para generar energía eléctrica. En una configuración contemplada actualmente, el aerogenerador 100 incluye una torre 102, configurada para soportar una góndola 106 y un rotor 108, y una unidad de alimentación 104. La torre 102 funciona para elevar la unidad de alimentación 104 a una altura sobre el nivel del suelo o el nivel del mar en la que el viento que va más rápido pasa a través del aerogenerador 100. La altura de la torre 102 puede seleccionarse en base a factores y condiciones bien conocidos en la técnica.

La unidad de alimentación 104 puede estar configurada para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. La unidad de alimentación 104 puede incluir una o más subunidades tales como una góndola 106 y un rotor 108. La góndola 106 aloja componentes para convertir la energía mecánica del rotor 108 en energía eléctrica. Específicamente, la góndola 106 aloja un generador 110 que se utiliza para generar la energía eléctrica en base a la energía mecánica proporcionada por el rotor 108. Además del generador 110, la góndola 106 también puede alojar otros componentes, tales como un multiplicador 112, un eje rotor 114, un dispositivo de accionamiento de viraje 120 y un sistema de control 124, pero sin limitarse a éstos.

El eje del rotor 114 está conectado a un buje del rotor 116 y al multiplicador 112, tal como se representa en la figura 1. El eje del rotor 114 puede utilizarse para accionar un eje de alta velocidad opcional (no mostrado en la figura 1) que se encuentra encerrado en el interior del multiplicador 112 y puede accionar, además, un generador 110 que está montado en un bastidor principal 118 para generar la energía eléctrica. En una realización, el multiplicador 112 y el eje del rotor 114 pueden estar configurados para operar, controlar y/u optimizar el rendimiento del aerogenerador 100. Además, el dispositivo de accionamiento de viraje 120 y una plataforma de viraje 122 pueden proporcionar un sistema de control de viraje para el aerogenerador 100. En una realización, el sistema de control de viraje puede ser accionado y controlado eléctricamente por el sistema de control 124 en base a la información recibida de un anemómetro 126 montado en la góndola 106.

El rotor 108 está configurado para convertir la energía cinética del viento que pasa a través del aerogenerador 100 en energía mecánica. Esta energía mecánica convertida se proporciona adicionalmente al generador 110 para generar energía eléctrica. En la configuración contemplada actualmente, el rotor 108 está acoplado operativamente al eje del rotor 114 a través de un conjunto de cojinetes. El rotor 108 incluye el buje del rotor 116 y una pluralidad de palas (mostradas en la figura 2) que se proyectan hacia afuera desde el buje del rotor 116 en posiciones distribuidas circunferencialmente alrededor del mismo. En el ejemplo representado en la figura 1, se muestra que el buje del rotor 116 incluye tres palas. Sin embargo, el número de palas puede variar. Las palas están configuradas para interactuar con el flujo de aire que pasa para producir una elevación que hace que el buje del rotor 116 gire alrededor de un eje longitudinal 128. Además, al girar el buje del rotor 116, el eje del rotor 114 acoplado al buje del rotor 116 también gira causando que generador 110 genere energía eléctrica.

De acuerdo con la realización de la figura 1, el sistema de control 124 puede incluir uno o más microcontroladores (no mostrados en la figura 1) que se utilizan para la supervisión y el control general del sistema global del aerogenerador 100. En un ejemplo, la supervisión y el control del sistema puede incluir regulación de cabeceo y velocidad, control de eje de alta velocidad y de freno de viraje, control de motor de viraje y bomba, y control de fallos. Además, el sistema de control 124 puede proporcionar señales de control a un dispositivo de accionamiento de cabeceo 130 (o sistema de cabeceo) para controlar la inclinación de las palas. En una realización, la inclinación de las palas puede controlarse individualmente a través del dispositivo de accionamiento de cabeceo 130. Por ejemplo, cada pala puede tener un dispositivo de accionamiento de cabeceo 130 independiente que varíe o cambie la inclinación de la pala correspondiente en base a la señal de control recibida desde el sistema de control 124.

El aerogenerador 100 está diseñado para generar energía eléctrica en una amplia gama de velocidades del viento. Sin embargo, en un rango particular de velocidades del viento, por ejemplo 80% - 120% de la velocidad nominal del viento, el rotor 108 puede sufrir una alta carga de empuje aerodinámico del rotor. En algunos casos, esta carga de empuje puede desviar la pala o el rotor hasta el punto de que se superen los márgenes de seguridad establecidos para certificación de la turbina. En algunas circunstancias, una pala podría golpear la torre 102 causando la destrucción del aerogenerador. Las cargas de viento en las palas pueden transferir cargas no deseadas sobre el rotor y los cojinetes asociados al mismo, y estas cargas pueden provocar el desgaste de los cojinetes del eje del rotor.

Para abordar estos problemas, de acuerdo con aspectos de ejemplo de la presente descripción, el aerogenerador 100 puede incluir el sistema de control 124 que controla el momento físico del eje del rotor del aerogenerador 108, que, a su vez, mejora el espacio libre de la torre del aerogenerador 100 y reduce el desgaste causado por cargas de viento desequilibradas (por ejemplo, causadas por cizalladura del viento). El espacio libre de la torre puede definirse como el espacio libre que se dispone para que las palas giren sin golpear la torre o más específicamente como una distancia entre la torre y las palas giratorias para evitar que las palas giratorias golpeen la torre. La cizalladura del viento puede hacer que el rotor se incline hacia atrás y esto aplica fuerzas no deseadas en los cojinetes del eje del rotor. El sistema de cabeceo puede compensar la cizalladura del viento, pero el cabeceo de cada pala debe ajustarse de manera individual y constante. Esto puede causar un desgaste en los componentes del dispositivo de accionamiento de cabeceo.

De acuerdo con una realización, un sistema de detección está configurado para determinar por lo menos uno de cargas del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento, y desequilibrio de cargas (que puede deberse a la cizalladura del viento). Un sistema de ajuste está configurado para ajustar un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a por lo menos uno de carga del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento y/o desequilibrio de cargas. El sistema de ajuste está configurado para correlacionar por lo menos uno de carga del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento y desequilibrio de cargas a través de un sistema de ecuaciones o una tabla de consulta.

De acuerdo con otra realización, un sistema de detección está configurado para estimar dinámicamente el desequilibrio de cargas a partir de datos aerodinámicos predeterminados del sistema y una medición de desequilibrio de cargas para proporcionar un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje. Un sistema de compensación está configurado para calcular un comando de corrección del momento del eje en base a la salida del valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje del sistema de ajuste, y el sistema de cabeceo está configurado para ajustar la carga de por lo menos una pala del aerogenerador en base al comando de corrección del punto de ajuste del momento del eje.

Dado que múltiples velocidades del viento, tomadas a diferentes elevaciones, pueden ser un indicador de cizalladura del viento, de acuerdo con otra realización, el sistema de control 124 regula un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje del rotor 108 de acuerdo con valores de cizalladura del viento detectados o múltiples valores de velocidad del viento (tomados a lo largo de diferentes elevaciones). Sólo como ejemplos no limitativos, un sistema de ecuaciones y/o una tabla de consulta puede incluir los siguientes valores: si la cizalladura del viento es 0,1, entonces la corrección del punto de ajuste del momento del eje es 900 kNm, si la cizalladura del viento es 0,2, entonces el punto de ajuste del momento del eje es 750 kNm, si la cizalladura del viento es 0,4, entonces el punto de ajuste del momento del eje es 650 kNm. El sistema de control 124 puede correlacionar el valor de momento del eje de referencia previamente almacenado correspondiente a por lo menos uno de la cizalladura del viento, velocidad del viento, y desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento detectados.

Además, el sistema de control 124 puede comparar el momento físico del eje del rotor 108 con el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje de referencia regulado para calcular un comando de corrección del momento del eje para un sistema configurado para regular la carga de por lo menos una pala del aerogenerador, tal como la inclinación de una pala, la posición de una aleta, la posición de una micro-lengüeta, la posición de un alerón o una posición de un dispositivo de control de flujo activo, según el comando de corrección del punto de ajuste del momento del eje. Las aletas, las micro-lengüetas, el alerón y los dispositivos de control de flujo activo se indican con el número 230 en la figura 2. En una realización, el sistema de control 124 también tiene en cuenta la posición del rotor (acimut) de cada pala individual al realizar los cálculos. El comando de ángulo de inclinación calculado se envía al dispositivo de accionamiento de cabeceo (o sistema de cabeceo) 130 para variar el cabeceo (o la posición de la aleta, la posición de la micro-lengüeta, la posición del alerón o la posición del dispositivo de control de flujo activo) de cada una de las palas. En particular, las palas se mueven o se giran un ángulo incluido en el comando de ángulo de inclinación para variar las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas giratorias lo que, a su vez, controla el momento físico del eje del rotor 108. Además, esta variación de las fuerzas aerodinámicas en las palas giratorias puede reducir todavía más la magnitud y/o la duración de la carga de empuje aerodinámica sobre el rotor 108. Al

reducir la carga de empuje aerodinámica en el rotor 108 y reducir la activación del sistema de cabeceo, el desgaste general experimentado por el sistema de cabeceo y los componentes se reduce.

5 Con referencia a la figura 2, se ilustra una ilustración esquemática del aerogenerador 100, de acuerdo con aspectos de la presente descripción. La figura 2 ilustra las palas del rotor 202, 204 acopladas al buje del rotor 116. Las palas del rotor 202, 204 giran en su posición inicial o posición "sin carga" con un espacio libre de la torre 206. El espacio libre de la torre 206 puede denominarse distancia entre la torre 102 y la pala que se encuentra delante de la torre 102. Además, cuando una carga de empuje aerodinámica o cizalladura del viento actúa sobre el rotor 108, las palas 202, 204 del rotor 108 pueden desviarse hacia la torre 102. El empuje aerodinámico la carga en el rotor 108 puede deberse al viento a alta velocidad que pasa a través del rotor 108. Por ejemplo, pueden producirse cargas de empuje aerodinámico elevadas cuando la velocidad del viento se encuentra en un rango de entre aproximadamente un 80% y aproximadamente un 120% de la velocidad nominal del viento. La carga de cizalladura del viento en el rotor 108 puede deberse a viento a alta velocidad que pasa a través de la parte superior del rotor 108 y a viento a baja velocidad que pasa a través de la parte inferior del rotor 108. En este caso, las palas del rotor se encontrarán en la posición indicada por 202 y 204.

En funcionamiento, la desviación de las palas 202, 204 puede aplicar cargas desequilibradas (es decir, desequilibrio de cargas) en el rotor y/o los cojinetes del eje principal. Para reducir la fatiga causada por la carga desequilibrada en el rotor 108, puede utilizarse el sistema de control 124 para controlar el momento físico del eje del rotor 108 que, a su vez, mejora la carga desequilibrada debido a la cizalladura del viento. En particular, en respuesta a la desviación del rotor 108 y/u otros componentes del aerogenerador 100, el sistema de control 124 puede variar la inclinación de las palas para reducir la carga desequilibrada en el rotor 108. Más específicamente, en una realización, el sistema de control 124 puede variar la inclinación de las palas de modo que la pala 202 que se encuentra delante de la torre 102 se incline de manera que la pala del rotor quede más perpendicular a la dirección del viento, y la pala 204 se incline de manera que sólo parte de la energía eólica incida en la pala del rotor. Esta acción disminuye la carga de cizalladura del viento en el rotor 108. El cabeceo de cada una de las palas se varía de manera correspondiente a los ángulos de cabeceo asimétricos determinados mediante el sistema de control 124. El aspecto de determinar los ángulos de cabeceo asimétricos se explicará con mayor detalle con referencia a la figura 4.

30 La figura 3 es una ilustración esquemática de un aerogenerador que representa sensores de proximidad y una brida del eje principal, de acuerdo con aspectos de la presente descripción. El aerogenerador 100 incluye una brida del eje principal 302 que se encuentra dispuesta alrededor del eje del rotor (o eje principal) 114 (mostrado en la figura 1). En particular, la brida del eje principal 302 está dispuesta en una parte del eje del rotor 114 que está adyacente al buje del rotor 116 (mostrado en la figura 1). Además de la brida del eje principal 302, el aerogenerador 100 incluye uno o más sensores de proximidad 304, 306, 308, 310 para medir el desplazamiento de la brida del eje principal 302. Por ejemplo, la desviación del rotor 108 puede desplazar la brida del eje principal 302 desde una posición predeterminada de reposo o "sin carga". En una realización, el uno o más sensores de proximidad 304, 306, 308, 310 pueden utilizarse para medir el desplazamiento de la brida del eje principal 302 respecto a un bastidor de referencia no deflector. El bastidor de referencia no deflector puede comprender, por ejemplo, la bancada o la carcasa del cojinete principal del eje de baja velocidad.

En la realización de la figura 3, los cuatro sensores de proximidad 304-310 se encuentran situados a aproximadamente 90 grados separados en la superficie de la brida del eje principal 302. Los sensores de proximidad 304-310 pueden generar señales en respuesta a la desviación de los componentes del aerogenerador, tal como el rotor 108 y la brida del eje principal 302. En una realización específica, las señales se generan cuando la velocidad del viento se encuentra dentro de un rango predeterminado tal como, por ejemplo, 80% - 120% de la velocidad nominal del viento, ya que la carga de empuje aerodinámico puede actuar a través del rotor en este rango. Esta carga de empuje aerodinámico puede desviar aún más el rotor causando el desplazamiento de la brida del eje principal. La cizalladura del viento también puede actuar para desviar el rotor causando desplazamiento. Los sensores de proximidad 304-310 se utilizan para medir el desplazamiento de la brida del eje principal 302 y enviar las señales generadas que indican el desplazamiento de la brida del eje principal 302 al sistema de control 124 para determinar el momento físico del eje del rotor 108. Estas señales también pueden traducirse en una indicación de carga del rotor, cizalladura del viento o desequilibrio de cargas.

55 Operativamente, el sistema de control 124 puede determinar primero la posición "sin carga" durante un proceso de inicialización. La posición "sin carga" puede determinarse utilizando cálculos del controlador de la turbina de las señales del sensor de la brida del eje principal durante una operación de giro lento del rotor. Este proceso puede producirse en el arranque del sistema con todas las palas del rotor inclinadas, por ejemplo, a 65 grados. Además, durante el funcionamiento del aerogenerador 100, el sistema de control 124 puede determinar la carga en las palas que desvían el rotor 108 utilizando los datos o señales de los sensores de proximidad 304-310. En una realización, estas señales pueden indicar el desplazamiento de la brida del eje principal 302 debido a la desviación del rotor 108. Con estos datos o información, el sistema de control 124 puede variar la inclinación de las palas para reducir la carga de empuje aerodinámico sobre las palas

5 Puede disponerse una pluralidad de sensores de las palas 320 en o cerca de cada pala 202, 203, 204, y los sensores 320 pueden estar configurados para medir el desplazamiento de la pala, la aceleración de la pala y/o la carga en las palas. Por ejemplo, las cargas asimétricas de la pala pueden indicar un estado de desequilibrio de cargas. Un sensor de desplazamiento puede ser un sensor de medición de proximidad o distancia. Un sensor de aceleración puede ser un acelerómetro, y un sensor de carga puede incluir sensores de desplazamiento, acelerómetros o cualquier otro sensor adecuado. El desplazamiento de la pala, la aceleración de la pala y/o las cargas de la pala pueden traducirse en una indicación de carga del rotor, cizalladura del viento o desequilibrio de cargas, y estos valores pueden traducirse en valores de corrección del punto de ajuste del momento del eje y comandos de corrección del momento del eje que se utilizan para controlar el sistema de cabeceo.

15 Con referencia a la figura 4, se representa un diagrama de bloques de un sistema de control, de acuerdo con aspectos de la presente descripción. Para facilitar la comprensión de la presente descripción, el sistema de control 400 se describe con referencia a los componentes de la figura 1. El sistema de control 400 puede ser representativo del sistema de control 124 de la figura 1. El sistema de control 400 puede configurarse para la supervisión y el control general del sistema del aerogenerador 100. En un ejemplo, la supervisión y el control del sistema pueden incluir regulación de cabeceo y velocidad de las palas, aplicación del eje de alta velocidad y el freno de viraje, aplicación del motor de viraje y cabeceo, y control de fallos.

20 El sistema de control 400 puede utilizarse para regular el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje del aerogenerador 100. El sistema de control 400 incluye un sistema de detección 402, un sistema de ajuste 403, un sistema de compensación 404 y un sistema de accionamiento de cabeceo 406 (o sistema de cabeceo). El sistema de detección 402 está configurado para determinar por lo menos uno de carga del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento, y desequilibrio de cargas. El valor de cizalladura del viento puede determinarse a partir de por lo menos dos anemómetros 220, 221 separados verticalmente a lo largo del aerogenerador. Puede configurarse un sistema de detección por luz y distancia (LIDAR) (o un sistema de medición ultrasónica) 140 para detectar múltiples velocidades del viento en posiciones separadas verticalmente a lo largo del aerogenerador. Una torre de medición 230 asociada a un parque eólico, que incluye el aerogenerador 100, puede incluir uno o más detectores de velocidad del viento 231, 232 (tales como, por ejemplo, anemómetros, un sistema de medición ultrasónica, etc.) para detectar la cizalladura del viento. Por ejemplo, el valor de cizalladura del viento puede obtenerse a partir de velocidades del viento en múltiples posiciones separadas verticalmente a lo largo de la torre 230. La cizalladura del viento también puede obtenerse a partir de la salida de datos de una pluralidad de sensores de proximidad 304, 306, 308, 310 que estén configurados para medir un desplazamiento de la brida del eje principal 302.

35 El sistema de ajuste 403 está configurado para regular un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a por lo menos uno de carga del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento, y/o desequilibrio de cargas. Un momento del eje de referencia puede denominarse punto de ajuste del momento del eje o valor de referencia para el momento físico del eje del rotor 108. Además, este momento del eje de referencia puede almacenarse previamente antes del funcionamiento del aerogenerador 100. En una realización, el punto de ajuste del momento del eje de referencia puede seleccionarse y almacenarse en el sistema de control 124 en base a una velocidad de viento estándar del aerogenerador 100. El sistema de ajuste 403 puede configurarse para hacer referencia a una tabla de consulta 405 que correlacione valores de corrección del punto de ajuste del momento del eje con por lo menos uno de carga del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento, y/o desequilibrio de cargas. Sólo como ejemplos no limitativos, la tabla de consulta 405 puede incluir los siguientes valores: si la cizalladura del viento es 0,1, entonces la corrección del punto de ajuste del momento del eje es 900 kNm, si la cizalladura del viento es 0,2, entonces la corrección del punto de ajuste del momento del eje es de 750 kNm, si la cizalladura del viento es de 0,4, entonces la corrección del punto de ajuste del momento del eje es de 650 kNm.

50 El sistema de compensación 404 está configurado para calcular un comando de ángulo de inclinación en base a la salida de corrección del punto de ajuste del momento desde el eje del sistema de ajuste 403. El sistema de accionamiento de cabeceo 406 está configurado para variar el cabeceo del rotor 202, 203, 204 en base al comando de ángulo de inclinación.

55 En la configuración contemplada actualmente, la unidad de detección 402 incluye un programador 408 y un estimador 410. El estimador 410 puede configurarse para determinar el empuje aerodinámico y/o la cizalladura del viento. En particular, como ejemplo no limitativo, el estimador 410 recibe una señal de potencia 416 y una señal de velocidad del generador 418 desde el generador 110. La señal de potencia 416 puede indicar la potencia máxima producida por el generador 110. De manera similar, la señal de velocidad del generador 418 puede indicar una velocidad de giro de un rotor del generador dispuesto dentro del generador 110. Posteriormente, el estimador 410 utiliza la señal de potencia recibida 416 y la señal de velocidad del generador 418 para determinar el empuje aerodinámico en el rotor. Si se desea, puede utilizarse un ángulo promedio de las palas acopladas al buje del rotor

116 además de la potencia producida por el generador 110 y/o la velocidad del generador 110 para determinar el empuje aerodinámico en el rotor.

5 En otra realización, el estimador 410 utiliza la señal de potencia recibida 416, la señal de velocidad del generador 418, y el ángulo promedio de las palas acopladas al buje del rotor 116 para determinar la velocidad del viento que pasa a través del aerogenerador 100. Por ejemplo, si a través del rotor 108 pasa viento a una velocidad particular, las palas que se encuentran en un ángulo particular pueden interactuar con el flujo de aire o el viento que pasa para producir una elevación que hace que el buje del rotor 116 gire alrededor de un eje longitudinal 128. Este movimiento giratorio del buje del rotor 116 puede hacer girar todavía más el rotor del generador que, a su vez, produce energía eléctrica en una salida del generador 110. Por lo tanto, conociendo el ángulo promedio de las palas, la energía producida por el generador 110 y la velocidad del rotor del generador, el estimador 410 puede determinar la velocidad del viento que pasa a través del aerogenerador 100. En otra realización, puede utilizarse uno o más sensores de velocidad del viento 414 para determinar o predecir la velocidad del viento y la cizalladura del viento. Posteriormente, el estimador 410 puede proporcionar por lo menos uno de cizalladura del viento, velocidad del viento, y desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento al planificador 408.

20 Como ejemplo, además de determinar la cizalladura del viento, el empuje aerodinámico y/o la velocidad del viento, el estimador 410 también puede medir un desplazamiento de la brida del eje principal 302. Para ese fin, el estimador 410 puede incluir uno o más sensores de proximidad 412. Los sensores de proximidad 412 pueden ser representativos de los sensores de proximidad 304-310 de la figura 3. Además, estos sensores de proximidad 304-310 pueden utilizarse para medir un desplazamiento de la brida del eje principal 302. En particular, el rotor 108 puede sufrir una carga de cizalladura del viento elevada cuando a través del rotor 108 pasa viento a múltiples velocidades. Esta carga de cizalladura del viento en el rotor 108 puede desviar el rotor 108 lo que, a su vez, desplaza la brida del eje principal 302 desde una posición inicial o una posición predeterminada. En una realización, la brida del eje principal 302 puede desplazarse desde un bastidor fijo o un bastidor de referencia. Además, al medir el desplazamiento de la brida del eje principal 302, el estimador 410 puede enviar el desplazamiento medido de la brida del eje principal 302 al sistema de detección 408 para determinar el desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento.

30 De acuerdo con los aspectos de la presente descripción, el planificador 408 recibe por lo menos uno de cizalladura del viento, velocidad del viento, y/o desequilibrio de cargas determinados debido a la cizalladura del viento desde el estimador 410 y utiliza la cizalladura del viento, velocidad del viento y/o desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento para variar o regular el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje. El planificador 408 puede verificar primero si la cizalladura del viento determinada está por encima de un valor predeterminado. En caso afirmativo, entonces el planificador 408 puede variar o regular el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje correspondiente a la cizalladura del viento, tal y como está almacenado en la tabla de consulta 405.

40 En otra realización, el planificador 408 recibe el desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento desde el estimador 410 y lo utiliza para variar el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje. El planificador 408 puede verificar primero si el desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento se encuentra dentro de un rango predeterminado. Por ejemplo, el rango predeterminado puede ser 80% - 120% del punto de ajuste del momento del eje. Si el desequilibrio de cargas se encuentra dentro de este rango predeterminado, el planificador 408 varía o regula el valor del punto de ajuste del momento del eje. En una realización, el planificador 408 puede utilizar la tabla de consulta 405 para variar el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje. Por ejemplo, la tabla de consulta 405 puede incluir los valores de corrección del punto de ajuste del momento del eje asociados a sus correspondientes cargas del rotor, velocidades del viento, cizalladura del viento o valores de desequilibrio de cargas. El sistema de ajuste 403 puede seleccionar el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje que está asociado a las cargas del rotor, velocidades del viento, cizalladura del viento o desequilibrio de cargas determinados desde la tabla de consulta 405. Posteriormente, el sistema de ajuste 403 puede enviar el valor de corrección variado del punto de ajuste del momento del eje al sistema de compensación 404.

55 De acuerdo con los aspectos de la presente descripción, el sistema de compensación 404 está configurado para recibir el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje variado desde el sistema de ajuste 403 y el desplazamiento medido de la brida del eje principal desde el estimador 410. El sistema de compensación 404 puede utilizar el desplazamiento medido de la brida del eje principal 302 para determinar el momento físico del eje del rotor del aerogenerador 108. El sistema de ajuste 403 puede tener una tabla de consulta que incluya diferentes correcciones del punto de ajuste del momento del eje que se asignan a los valores de desplazamiento correspondientes de la brida del eje principal 302. El sistema de ajuste 403 puede utilizar esta tabla de consulta para determinar la corrección del punto de ajuste del momento del eje asociada al valor de desplazamiento medido de la brida del eje principal 302.

Al determinar el momento del eje, el sistema de compensación 404 puede comparar este punto de ajuste del momento del eje con el momento del eje de referencia variado recibido desde el sistema de ajuste 403. En particular, el sistema de compensación 404 identifica una diferencia entre el momento del eje y el punto de ajuste del momento del eje variado. Si la diferencia entre estos momentos del eje está por encima de un valor predefinido, el sistema de compensación 404 puede calcular un comando de ángulo de inclinación asimétrico correspondiente a la diferencia entre los dos momentos del eje. El comando de ángulo de inclinación puede incluir uno o más ángulos de cabeceo asimétricos para cada una de las palas. En una realización, se utiliza una transformación DQ de Park, un cálculo de procedimiento de estimación de empuje y/u otra técnica de control para calcular el ángulo de inclinación o el incremento de cabeceo para cada pala del rotor para reducir la carga asimétrica general del rotor debido a la cizalladura del viento.

El comando de ángulo de inclinación asimétrico se envía al sistema de accionamiento de cabeceo 406 para variar el cabeceo del rotor 202, 203, 204 o al sistema de viraje 407 para variar la posición (o dirección) de la góndola y el rotor (es decir, la cabeza de la máquina). El sistema de accionamiento de cabeceo 406 puede utilizar uno o más dispositivos de accionamiento de cabeceo 120 para variar la inclinación de las palas. Estos ángulos de cabeceo asimétricos se envían a las palas de manera que el ajuste promedio del ángulo de inclinación es cero y viene dado por la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{Pala 1} &= A \sin(\theta) \\ \text{Pala 2} &= A \sin(\theta - 120) \\ \text{Pala 3} &= A \sin(\theta + 120) \end{aligned}$$

Donde A es la amplitud del comando de cizalladura de compensación y θ es la posición azimutal del rotor. Por ejemplo, si el ángulo de inclinación de una de las palas se incrementa en +1 grado, entonces el ángulo de inclinación de las otras dos palas disminuye en -0,5 grados y -0,5 grados. El dispositivo de accionamiento de cabeceo 120 se utiliza para mover o girar la pala correspondiente un ángulo asociado a su ángulo de inclinación. Variando la inclinación de las palas se controla el momento del eje físico del rotor 108. Variando la inclinación de las palas puede variarse el movimiento de giro de las palas lo que, a su vez, varía las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el rotor 108, particularmente las palas. Esta variación de las fuerzas aerodinámicas sobre el rotor 108 puede mitigar la carga de cizalladura del viento en el rotor 108. Reduciendo la carga de cizalladura del viento y el reduciendo el funcionamiento del sistema de cabeceo, puede mejorarse el funcionamiento general y la longevidad del aerogenerador. El sistema de control mejora el funcionamiento del sistema de cabeceo y la vida útil de los componentes del sistema de cabeceo (por ejemplo, motores de accionamiento de cabeceo, cojinetes de cabeceo, etc.).

La figura 5 ilustra un diagrama de flujo para un procedimiento 500 para controlar el desequilibrio del rotor en el aerogenerador, de acuerdo con aspectos de la presente descripción. El procedimiento se describe con referencia a los componentes de las figuras 1-4. El procedimiento 500 comienza en la etapa de detección 502, donde se detecta por lo menos uno de cargas del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento, y/o desequilibrio de cargas. En la etapa de selección 504, se selecciona un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a por lo menos uno de cargas del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento, o desequilibrio de cargas que se obtiene en la etapa 502. Puede seleccionarse un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a una carga del rotor, desequilibrio de cargas o un valor de cizalladura del viento, y se hace referencia a una tabla de consulta que correlaciona los valores de corrección del punto de ajuste del momento del eje con una carga del rotor, desequilibrio de cargas o valores de cizalladura del viento. Alternativamente, la corrección del punto de ajuste del momento del eje puede seleccionarse en base a la carga del rotor, múltiples valores de velocidad del viento o desequilibrio de cargas, y se hace referencia a una tabla de consulta que correlaciona la corrección del punto de ajuste del momento del eje con estos valores. En cualquier caso, la obtención del valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje puede lograrse haciendo referencia a la tabla de consulta 405 en el sistema de ajuste 403. En la etapa de cálculo 506, el comando de ángulo de inclinación se calcula en base al valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje que se obtiene en la etapa de selección 504. En una etapa de control 508, se controla o se varía la inclinación de por lo menos una pala, si no todas las palas, en base a la salida del comando de ángulo de inclinación que se obtiene en la etapa de cálculo 506.

La etapa de detección 502 puede incluir obtener una salida de por lo menos dos anemómetros separados verticalmente a lo largo del aerogenerador, u obtener una salida de un sistema LIDAR configurado para detectar múltiples velocidades del viento en posiciones separadas verticalmente a lo largo del aerogenerador, u obtener una salida de una torre de medición asociada a un parque eólico que incluye el aerogenerador, u obtener resultados de un sistema de medición ultrasónica configurado para detectar múltiples velocidades del viento en posiciones separadas verticalmente a lo largo del aerogenerador. Alternativamente, la cizalladura del viento puede detectarse con datos obtenidos de los sensores de proximidad 304-310, ya que pueden asignarse cargas predefinidas a valores predeterminados de cizalladura del viento.

El sistema de control del aerogenerador 124, 400 puede programarse para realizar las etapas de detectar 502 por lo menos uno de carga del rotor, velocidad del viento, cizalladura del viento, y/o desequilibrio de cargas, seleccionar 504 un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a por lo menos uno de carga del rotor, cizalladura del viento, velocidad del viento, y/o desequilibrio de cargas, calcular 506 un comando de ángulo de inclinación en base a una salida de corrección del punto de ajuste del momento del eje de la etapa de selección, y controlar 508 un cabeceo de por lo menos una pala del aerogenerador en base al comando de ángulo de inclinación con el sistema de cabeceo. El sistema de control 124 puede configurarse para comunicarse con por lo menos dos anemómetros 220, 221 separados verticalmente a lo largo del aerogenerador, o para comunicarse con un sistema de detección por luz y distancia (LIDAR) 140 configurado para detectar múltiples velocidades del viento en posiciones separadas verticalmente a lo largo del aerogenerador o un sistema de medición ultrasónica. El sistema de control también puede configurarse para comunicarse con una torre de medición 230 asociada a un parque eólico que incluye el aerogenerador, el que la torre de medición incluye un detector de velocidad del viento 231, 232 para detectar el valor de cizalladura del viento a partir de velocidades del viento en múltiples posiciones separadas verticalmente. Alternativamente, el sistema de control puede configurarse para comunicarse con un sistema de detección 402 que está configurado para detectar cizalladura del viento con datos obtenidos de una pluralidad de sensores de proximidad configurados para medir un desplazamiento de una brida del eje principal del aerogenerador, o una pluralidad de sensores de pala. El sistema de control 400 está configurado para comunicarse con el sistema de ajuste 403 que está configurado para regular un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base al valor de cizalladura del viento, y el sistema de ajuste 403 hace referencia a una tabla de consulta 405 que correlaciona valores de corrección del punto de ajuste del momento del eje con carga del rotor, velocidad del viento, cizalladura del viento, o valores de desequilibrio de cargas.

La figura 6 ilustra un sistema de ecuaciones utilizado para regular el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje de acuerdo con un aspecto de la presente invención. La carga por gravedad es conocida y es constante. La carga de cizalladura es igual a la carga medida menos la carga de gravedad más la carga de cabeceo, y viene dada por la siguiente ecuación.

$$\text{Carga de cizalladura} = \text{carga medida} - \text{carga de gravedad} + \text{carga de compensación del regulador.}$$

La salida del regulador de carga de cizalladura debe limitarse a un valor que resida dentro de las capacidades del sistema de cabeceo y los límites operativos de la pala. Un cabeceo excesivo de la pala puede accionarla transitoriamente a un estado de bloqueo que podría aumentar otras cargas o afectar negativamente a la captura de energía. El sistema de cabeceo tiene límites en velocidades y aceleraciones máximas que también deben aplicarse. El límite del regulador ($+reg_{limit}$) puede determinarse mediante la siguiente ecuación.

$$+reg_{limit} = +limit_{cabeceo} * dF/d\theta \text{ kNm/grado}$$

Donde el límite de cabeceo ($+limit_{cabeceo}$) en grados viene determinado por las capacidades del sistema de cabeceo y márgenes de pérdida de la pala y el término ($dF/d\theta$) en kNm/grado es la ganancia de la pala que proviene de la geometría de la pala expresada como una derivada parcial en la velocidad de cambio en el empuje por grado de cabeceo. La ganancia de la pala puede expresarse como una constante, derivada de una búsqueda en la tabla o calcularse dinámicamente en base al ángulo de inclinación.

La invención permite medir la cantidad de cizalladura (o cargas) en el rotor cuando se conoce el componente a partir de la gravedad, detectar cuándo el sistema está funcionando a su capacidad máxima y proporcionar un medio para modificar el punto de ajuste para devolver el regulador de cizalladura a sus límites operativos. El punto de ajuste (es decir, el punto de funcionamiento de estado estable del momento de flexión en el eje del rotor) puede desplazarse a un nivel tal que los límites de fatiga estable de ciclo bajo, dinámico y ciclo alto puedan regularse según las condiciones del viento. En el ejemplo anterior, no se requiere la velocidad del viento para calcular la cizalladura del viento, ya que las cargas en el aerogenerador pueden utilizarse para calcular la cizalladura del viento (o cargas de rotor o desequilibrios de cargas). Puede detectarse la carga del rotor o el desequilibrio de cargas, y esta carga/desequilibrio puede separarse en sus respectivos componentes. Por ejemplo, los componentes de carga del rotor pueden incluir uno o más de desequilibrio por gravedad y desequilibrio aerodinámico, y los componentes de desequilibrio de cargas pueden incluir uno o más de desequilibrio por gravedad, desequilibrio de cizallamiento y desequilibrio de empuje. Además, el desequilibrio de cargas puede corregirse regulando el cabeceo de cada una de las palas mientras se tienen en cuenta los límites operativos y las variaciones de las fuerzas de las palas debido a la geometría y los ángulos de cabeceo. El desequilibrio de cargas también puede corregirse regulando la posición de viraje del aerogenerador (es decir, el rotor y la góndola) mientras se tienen en cuenta los límites operativos, o puede regularse tanto la posición de viraje como los ángulos de inclinación de la pala. El ajuste de la posición de viraje de la góndola y el rotor (es decir, la cabeza de la máquina) puede realizarse para modificar el momento de cabeceo (y reducir las cargas o desequilibrios), especialmente cuando existe cizalla horizontal o flujo ascendente/descendente.

5 La figura 7 ilustra un procedimiento 700 para variar el punto de ajuste, de acuerdo con un aspecto de la presente invención. El procedimiento 700 incluye una etapa 702 de comprobar el control para verificar que se encuentra en el límite. En la etapa 704 se calculan las cargas de cizalladura (o cargas del rotor). En la etapa 706, si el control se encuentra en el límite, el punto de ajuste se reduce para sacar el control del límite. En la etapa 708, si las cargas de cizalladura (o cargas del rotor) son elevadas, entonces el punto de ajuste se mueve para reducir las cargas del rotor, que generalmente se deben a cizalladura del viento.

10 Esta descripción escrita utiliza ejemplos para describir la invención, incluyendo el modo preferido, y también para permitir que cualquier persona experta en la materia ponga en práctica la invención, incluyendo la fabricación y uso de cualquier dispositivo o sistema y la realización de cualquier procedimiento incorporado. El alcance patentable de la invención está definido por las reivindicaciones, y puede incluir otros ejemplos que se les ocurran a los expertos en la materia.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de control (124) para un aerogenerador (100) que comprende por lo menos una pala (202, 204, 206), comprendiendo el sistema de control:
- 5 un sistema de detección (402) configurado para determinar por lo menos uno de una carga del rotor, una cizalladura del viento, una velocidad del viento, y un desequilibrio de cargas debido a cizalladura del viento; una pluralidad de sensores de proximidad (304-310) configurados para medir un desplazamiento de una brida del eje principal (302);
- 10 y estando caracterizado por una pluralidad de sensores de pala (320) configurados para medir un desplazamiento de la por lo menos una pala (202, 204, 206); en el que el desplazamiento de la brida del eje principal (302) y la por lo menos una pala (202, 204, 206) se traducen en una indicación de por lo menos uno de la carga del rotor, la cizalladura del viento, o el desequilibrio de cargas;
- 15 un sistema de ajuste (403) configurado para regular un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a la indicación de la carga del rotor, la cizalladura del viento, la velocidad del viento, o el desequilibrio de cargas;
- un sistema de compensación (404) configurado para calcular un comando de corrección del momento del eje en base al valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje enviado desde el sistema de ajuste; y
- un sistema de cabeceo (406) configurado para regular un cabeceo de dicha por lo menos una pala (202, 204, 206) del aerogenerador (100) en base al comando de corrección del punto de ajuste del momento del eje o un sistema de viraje (120) configurado para regular la posición de viraje de un rotor (108) en base al comando de corrección del punto de ajuste del momento del eje.
2. Sistema (124) de la reivindicación 1, en el que el sistema de detección (402) comprende, además, por lo menos uno de:
- 25 por lo menos dos anemómetros (220, 221) separados verticalmente a lo largo del aerogenerador (100); un sistema de detección por luz y distancia (LIDAR) (140); un sistema de medición ultrasónica; o
- 30 una torre de medición (230) asociada a un parque eólico que incluye el aerogenerador, incluyendo la torre de medición un detector de velocidad del viento para detectar el valor de cizalladura del viento a partir de velocidades del viento en múltiples posiciones separadas verticalmente.
3. Sistema (124) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de ajuste (403) está configurado para regular el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje estimando dinámicamente el desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento a partir de datos aerodinámicos predeterminados y una medición de desequilibrio de cargas para proporcionar la corrección del punto de ajuste del momento del eje.
- 35 4. Sistema (124) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de ajuste (403) está configurado para regular el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje correlacionando el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje con por lo menos uno de la cizalladura del viento, la velocidad del viento, o el desequilibrio de cargas debido a la cizalladura del viento a través de un sistema de ecuaciones o una tabla de consulta.
- 40 5. Sistema (124) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de cabeceo (406) está configurado para variar la carga en por lo menos una pala (202, 204, 206) regulando por lo menos uno de: inclinación de la pala, posición de una aleta, posición de una micro-lengüeta, posición de un alerón y posición de un dispositivo de control de flujo activo.
- 45 6. Procedimiento (500) para controlar un desequilibrio de un rotor en un aerogenerador (100), comprendiendo el procedimiento:
- 50 detectar (502) por lo menos uno de una carga de rotor, una cizalladura del viento, una velocidad del viento, o un desequilibrio de cargas; caracterizado por:
- 55 medir un desplazamiento de por lo menos una pala (202, 204, 206) del aerogenerador (100) utilizando una pluralidad de sensores de pala (320); medir un desplazamiento de una brida del eje principal (302) utilizando una pluralidad de sensores de proximidad (304-310);
- 60 traducir un desplazamiento de la brida del eje principal (302) y la por lo menos una pala (202, 204, 206) en una indicación de por lo menos uno de la carga del rotor, la cizalladura del viento o el desequilibrio de cargas; seleccionar (504) un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a la indicación de la carga del rotor, la velocidad del viento, la cizalladura del viento, o el desequilibrio de cargas; calcular un comando de corrección del momento del eje en base a la salida del valor de corrección del punto de ajuste del momento de eje desde la etapa de selección; y

controlarse un sistema de cabeceo (406) para regular una carga de dicha por lo menos una pala (203, 204, 206) del aerogenerador (100) en base al comando de corrección del momento del eje, o controlarse un sistema de viraje para regular una posición del rotor en base al valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje.

5 7. Procedimiento (500) de la reivindicación 6, en el que la etapa de detección (502) comprende, además, por lo menos uno de:

obtener una salida de por lo menos dos anemómetros (220, 221) separados verticalmente a lo largo del aerogenerador;

10 obtener una salida de un sistema de detección por luz y distancia (LIDAR) (140);

obtener una salida de un sistema de medición ultrasónica; o

obtener una salida de una torre de medición (230) asociada a un parque eólico que incluye el aerogenerador, incluyendo la torre de medición un detector de velocidad del viento para detectar la cizalladura del viento a partir de velocidades del viento en múltiples posiciones separadas verticalmente.

15 8. Procedimiento (500) de la reivindicación 6 o la reivindicación 7, en el que la etapa de selección (504) comprende, además:

seleccionar el valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a la correlación de por lo menos uno de la carga del rotor, la cizalladura del viento, la velocidad del viento, o el desequilibrio de cargas a través de un sistema de ecuaciones o una tabla de consulta.

20 9. Procedimiento (500) de cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la etapa de selección (504) comprende, además:

seleccionar un valor de corrección del punto de ajuste del momento del eje en base a una estimación dinámica del desequilibrio de cargas a partir de datos aerodinámicos predeterminados y una medición de desequilibrio de cargas para proporcionar el comando de corrección del momento del eje.

25

10. Procedimiento (500) de cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, en el que el desequilibrio de cargas se corrige regulando la inclinación de por lo menos una pala (202, 204, 206) a la vez que se tiene en cuenta el término kNm/grado en la siguiente ecuación:

30

$$+reg_{limit} = +limit_{cabeceo} * dF/d\theta \text{ kNm/grado}$$

donde $+reg_{limit}$ es el límite del regulador, $+limit_{cabeceo}$ es el límite de cabeceo y $dF/d\theta$ kNm/grado es la ganancia de la pala expresado como una derivada parcial en la velocidad de cambio de empuje por grado de cabeceo.

35

11. Aerogenerador (100) que comprende:

una torre (102) configurada para soportar una góndola (106) y un rotor (108), presentando el rotor por lo menos una pala de rotor (202, 204, 206);

40 un sistema de control (124) programado para realizar las etapas definidas por el procedimiento (500) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 6 a 10.

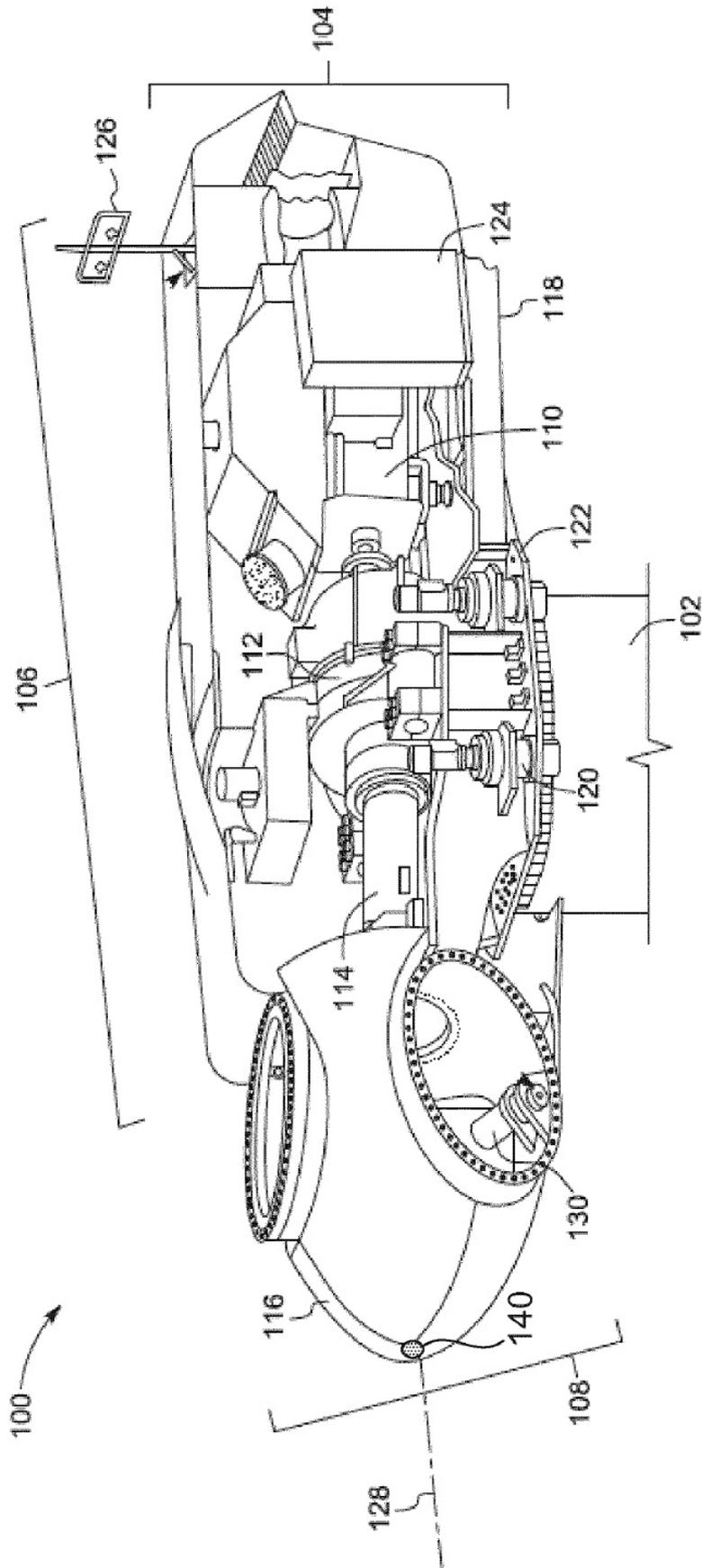


FIG. 1

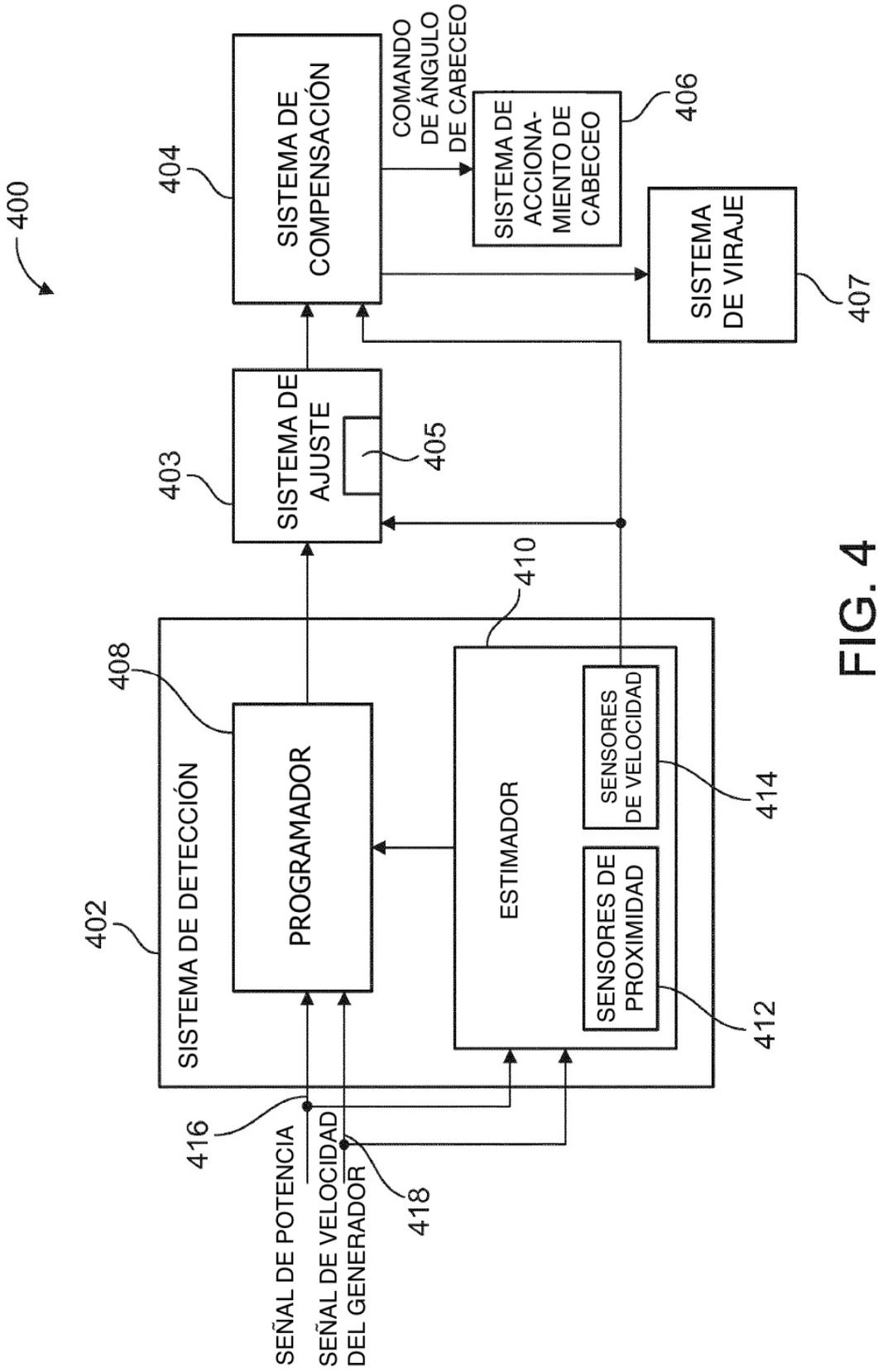


FIG. 4

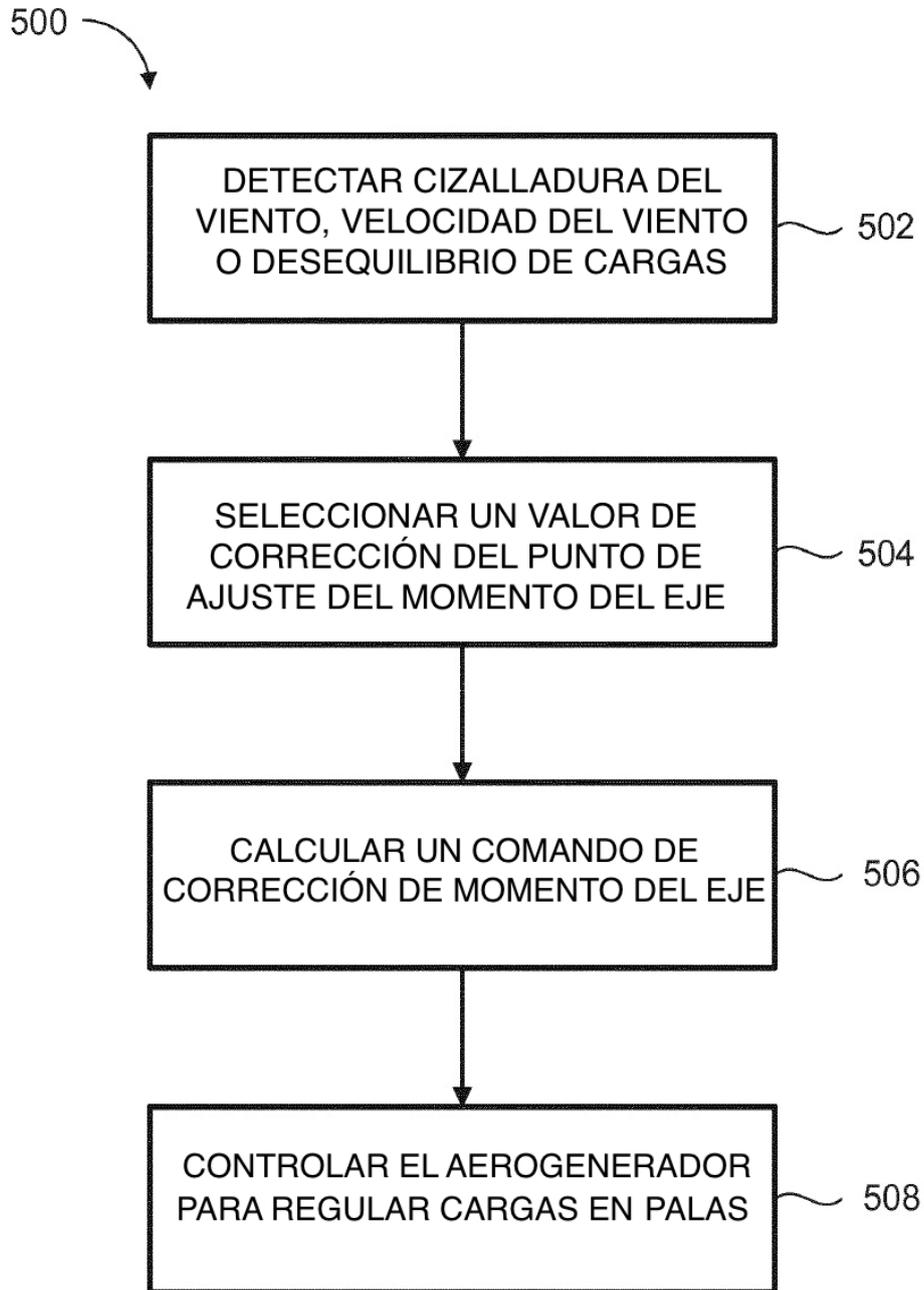


FIG. 5

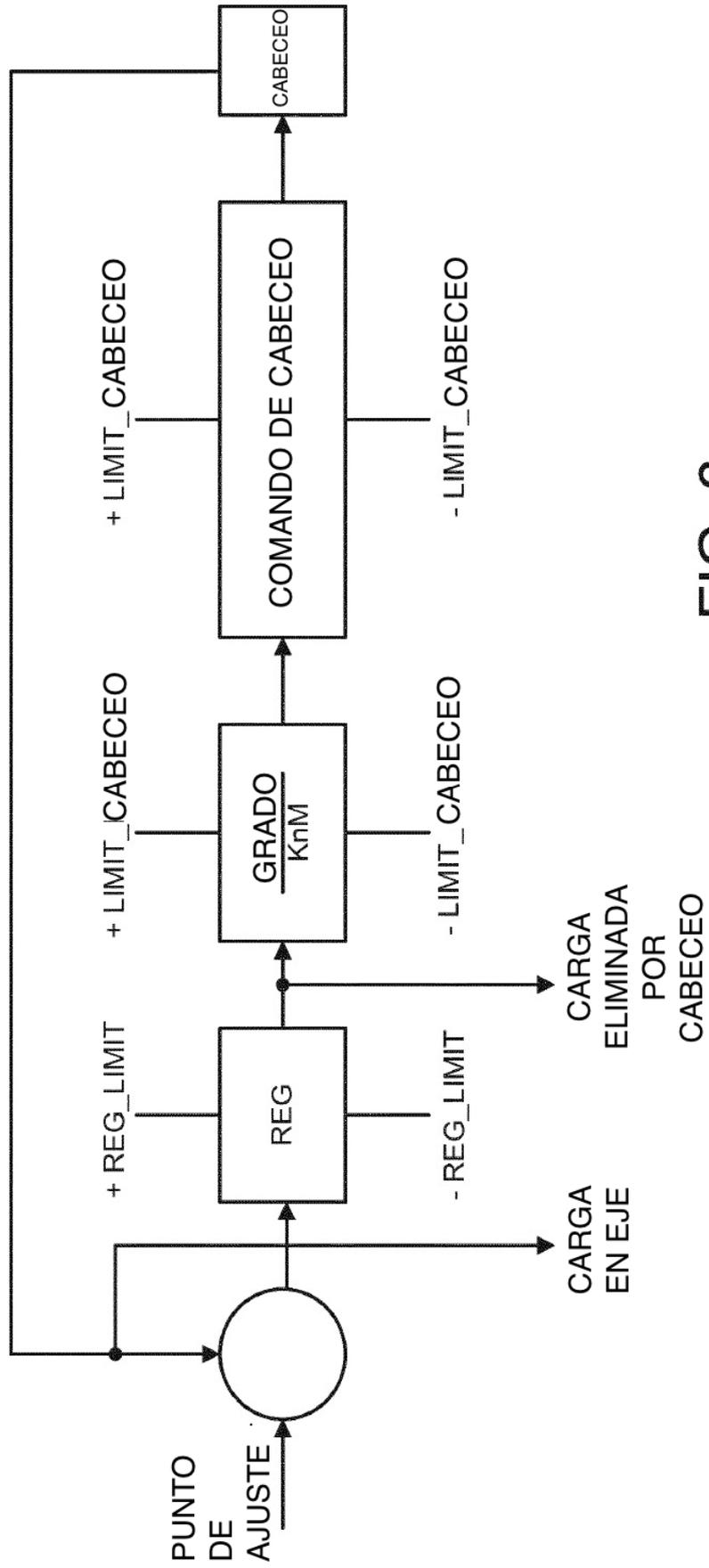


FIG. 6

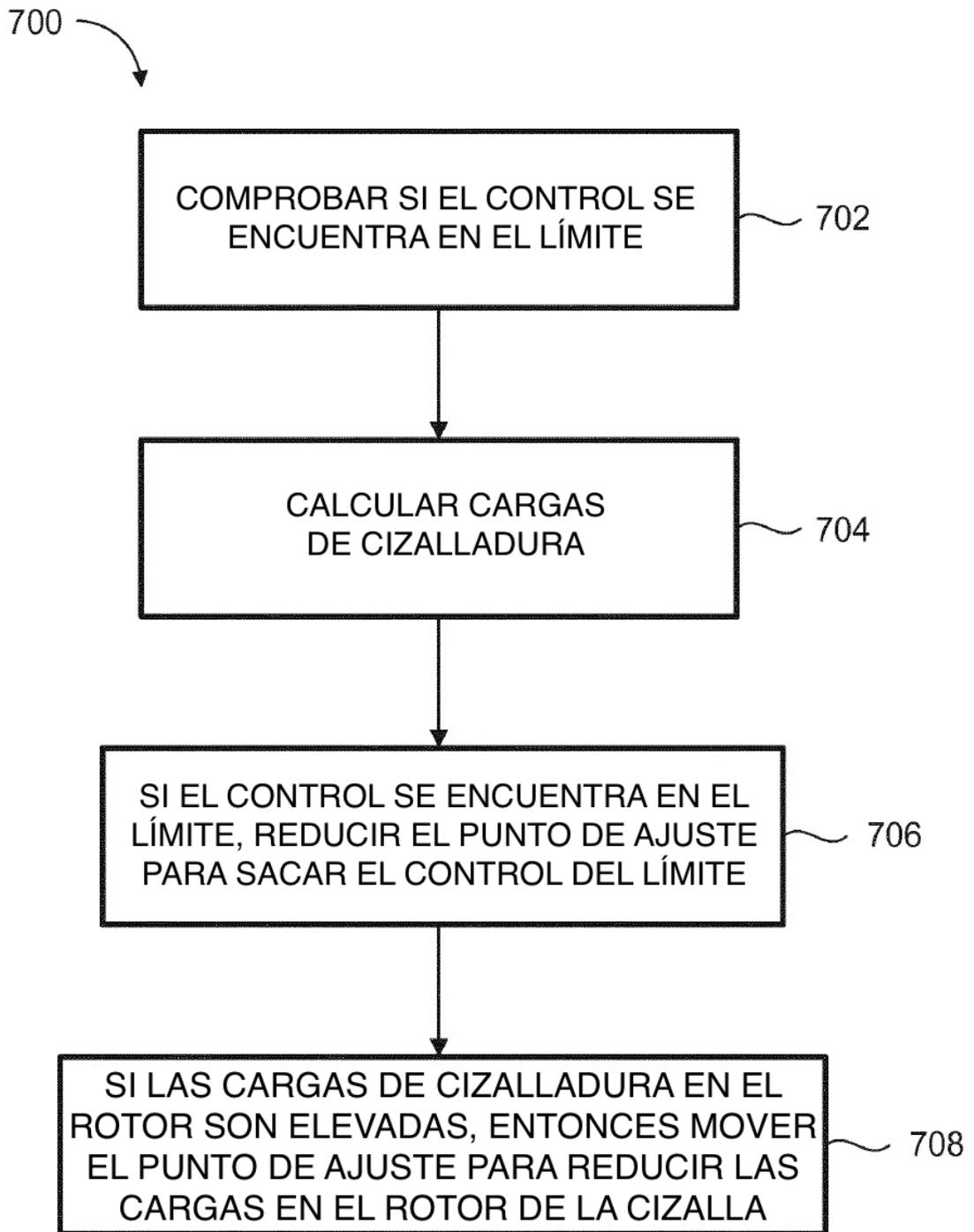


FIG. 7

