

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 822 986**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.03.2016** **PCT/DK2016/050075**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.09.2016** **WO16150442**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.03.2016** **E 16710393 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.09.2020** **EP 3271576**

54 Título: **Amortiguación de oscilaciones en una turbina eólica**

30 Prioridad:

20.03.2015 DK 201570160

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

05.05.2021

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

KRISTOFFERSEN, JACOB KROGH

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 822 986 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

Amortiguación de oscilaciones en una turbina eólica

5 Antecedentes

Campo de la invención

10 Las realizaciones presentadas en esta divulgación generalmente se refieren a un sistema de amortiguación de torre eólica, y más específicamente, a la desvinculación de una señal de control de la estrategia de activación usada para reducir las oscilaciones en la turbina eólica.

Descripción de la técnica relacionada

15 Las oscilaciones de torre pueden surgir cada vez que una pala de rotor pasa la torre y genera viento que empuja contra la torre. Otra fuente de oscilaciones de torre es la turbulencia del viento que puede provocar movimientos periódicos o instantáneos en la torre de turbina eólica. Las oscilaciones y vibraciones en una torre de una turbina eólica pueden someter a fatiga a la turbina eólica. Si no se controlan, estas oscilaciones pueden tener un efecto perjudicial en la vida útil de la turbina eólica.

20 Una forma de compensar las oscilaciones de torre es diseñar la torre teniendo en cuenta estas oscilaciones. Por ejemplo, las oscilaciones de torre pueden reducirse haciendo que la torre sea más rígida, diseñando las palas para mitigar las oscilaciones, reduciendo el peso de la góndola y el rotor, etc. Pero estas medidas de diseño a menudo entran en conflicto con otras cualidades deseadas de la turbina eólica, como el bajo coste y la alta eficiencia. Como tal, algunas turbinas, tal como se describe en los documentos EP 2 623 776 A2 y US 2013/230396 A1, incluyen un sistema de amortiguación de torre que se usa para contrarrestar activamente las oscilaciones de torre y las vibraciones detectadas en la turbina.

Sumario

30 Las realizaciones de la presente divulgación son un método y un medio de almacenamiento legible por ordenador según las reivindicaciones 1 y 15 para hacer funcionar una turbina eólica. El método y el medio de almacenamiento incluyen determinar un valor de peso de fatiga de torre basándose en una fuerza ejercida sobre la turbina eólica y determinar un valor de peso de viento basándose en las condiciones de viento medidas y una distribución de viento.

35 El método y el medio de almacenamiento incluyen combinar el valor de peso de fatiga de torre y el valor de peso de viento para obtener un valor de ganancia combinado y determinar un valor de accionamiento de paso para amortiguar una oscilación en la turbina eólica basándose en el valor de ganancia combinado.

40 Otra realización de la presente divulgación es un controlador de turbina eólica según la reivindicación 8 que incluye un procesador y un sistema de amortiguación de torre vinculado al procesador. El sistema de amortiguación de torre está configurado para determinar un valor de peso de fatiga de torre basándose en una fuerza ejercida sobre la turbina eólica y determinar un valor de peso de viento basándose en condiciones de viento medidas y una distribución de viento. El sistema de amortiguación de torre está configurado para combinar el valor de peso de fatiga de torre y el valor de peso de viento para obtener un valor de ganancia combinado y determinar un valor de accionamiento de paso para amortiguar una oscilación en la turbina eólica basándose en el valor de ganancia combinado.

Breve descripción de los dibujos

50 De modo que la manera en la que las características mencionadas anteriormente de la presente divulgación puedan comprenderse en detalle, puede hacerse una descripción más particular de la divulgación, brevemente resumida anteriormente, con referencia a realizaciones, algunas de las cuales se ilustran en los dibujos adjuntos. Debe indicarse, sin embargo, que los dibujos adjuntos solo ilustran realizaciones habituales de esta divulgación y, por lo tanto, no debe considerarse que limiten su alcance, ya que la divulgación puede admitir otras realizaciones igualmente eficaces.

55 La figura 1 ilustra una vista diagramática de una turbina eólica, según una realización descrita en el presente documento.

La figura 2 ilustra una vista diagramática de los componentes internos de la góndola y torre de una turbina eólica, según una realización descrita en el presente documento.

60 La figura 3 es un gráfico que ilustra las relaciones entre la aceleración de torre y la carga de fatiga sobre la torre, según una realización descrita en el presente documento.

65 La figura 4 es un gráfico que ilustra las relaciones entre la velocidad de viento y la carga de fatiga sobre la torre, según una realización descrita en el presente documento.

La figura 5 es un gráfico que ilustra las respectivas distribuciones de daños para la torre y el sistema de regulación de paso a diversas velocidades de viento, según una realización descrita en el presente documento.

La figura 6 es un diagrama de bloques de un controlador de turbina eólica, según una realización descrita en el presente documento.

La figura 7 es un gráfico que ilustra las relaciones entre el empuje sobre el rotor y la carga de fatiga sobre la torre, según una realización descrita en el presente documento.

La figura 8 es un flujo para determinar un valor de paso de pala para reducir las oscilaciones en una turbina eólica, según una realización descrita en el presente documento.

Para facilitar la comprensión, se han usado números de referencia idénticos, en la medida de lo posible, para designar elementos idénticos que son comunes a las figuras. Se contempla que los elementos dados a conocer en una realización pueden ser utilizados beneficiosamente en otras realizaciones sin mención específica.

Descripción de realizaciones a modo de ejemplo

Visión general

Se describen realizaciones en el presente documento usando un sistema de amortiguación de torre para contrarrestar activamente oscilaciones (o vibraciones) en una turbina eólica. Si no se controlan, estas oscilaciones pueden provocar daños estructurales a la torre u otros componentes en la turbina y reducir la vida útil de la turbina eólica. Ejemplos de sistemas de amortiguación de torre incluyen un sistema de amortiguación de torre de lado a lado (SSTD), que reduce las oscilaciones de torre en las direcciones izquierda y derecha cuando se orienta hacia un plano de rotor, y un sistema de amortiguación de torre de adelante a detrás (FATD), que reduce oscilaciones de la torre en las direcciones hacia delante y hacia atrás cuando se orienta hacia el plano de rotor. Estos sistemas de amortiguación generan señales de salida que luego se proporcionan a otros sistemas físicos de control en la turbina (por ejemplo, controladores de paso de pala o controladores de potencia) que usan entonces las señales de salida para reducir oscilaciones en la turbina.

El sistema de amortiguación de torre puede medir una o más aceleraciones en la turbina eólica (por ejemplo, aceleraciones de torre) para detectar oscilaciones en la turbina. A medida que estas aceleraciones aumentan, el sistema de amortiguación de torre aumenta la amplitud de un valor de referencia de paso de amortiguación que luego se usa para controlar el paso de palas en el rotor de la turbina. Al hacerlo, sin embargo, introduce un bucle de retroalimentación en un controlador que puede provocar un ciclo límite y hacer más difícil ajustar el controlador. Por ejemplo, a medida que aumenta la aceleración de torre, el sistema de amortiguación aumenta el valor de referencia de paso para disminuir la oscilación de torre y la aceleración de torre. Sin embargo, a medida que la aceleración medida disminuye, en respuesta, el sistema de amortiguación disminuye el valor de referencia de paso que permite aumentar la oscilación de torre. Este ciclo puede continuar mientras esté presente la fuente de la oscilación de torre. En lugar de depender únicamente de la aceleración de torre para determinar el valor de referencia de paso, puede ser ventajoso usar una métrica que se desvincula de la estrategia de activación (por ejemplo, una métrica que es independiente del sistema de amortiguación de torre) para controlar el paso de pala y evitar o mitigar este bucle de retroalimentación.

En una realización, se usa una fuerza ejercida sobre la turbina eólica para generar el valor de referencia de paso. Esta fuerza puede o bien medirse o bien estimarse a partir de otros valores. Por ejemplo, la fuerza puede ser una tensión sobre la torre de la turbina que se mide usando un indicador de tensión, o la fuerza puede ser un empuje sobre el rotor. En cualquier caso, esta fuerza puede correlacionarse con una carga de fatiga sobre la torre. Además, la turbina puede realizar un cálculo para desvincular la fuerza de la estrategia de activación. Es decir, la turbina determina el valor de la fuerza como si el sistema de amortiguación no estuviera activado o presente. Al usar el empuje sobre el rotor como ejemplo, el sistema de amortiguación estima un empuje de rotor que representa la fuerza sobre el rotor en ausencia de cualquier sistema de amortiguación. Es decir, el sistema de amortiguación estima el empuje del rotor como si el sistema de amortiguación no estuviera cambiando el paso de las palas sobre el rotor. Este empuje de rotor puede entonces correlacionarse con una carga de fatiga de la turbina. Al usar una fuerza de rotor que es independiente (es decir, está desvinculada) del sistema de amortiguación para generar el valor de referencia de paso, el bucle de retroalimentación y el ciclo de límite mencionado anteriormente puede evitarse o mitigarse.

En una realización, el sistema de amortiguación de torre usa la velocidad de viento actual y una distribución de viento para generar el valor de referencia de paso. Aunque una turbina eólica puede experimentar mayor turbulencia (y por tanto, mayores oscilaciones) a velocidades de viento más altas, la turbina eólica puede pasar relativamente menos horas funcionando a velocidades de viento más altas en comparación con velocidades de viento más bajas. Por ejemplo, sometándose a vientos a 20 m/s durante una hora puede provocar mayor fatiga de torre que experimentar vientos de 10 m/s durante la misma cantidad de tiempo, pero si la turbina gasta solo una pequeña fracción de su vida útil funcionando en velocidades de viento de 20 m/s en comparación con velocidades de viento de 10 m/s, entonces puede provocar un porcentaje mucho más alto del daño provocado a la torre debido a vientos de 10 m/s que vientos de 20 m/s. Por tanto, el sistema de amortiguación puede usar una distribución de viento que incluye un conjunto de

pesos que asignan un valor de peso a diversas velocidades de viento. Los valores de los pesos en las distribuciones pueden cambiar basándose en la cantidad de tiempo que la turbina eólica se hace funcionar a la velocidad de viento correspondiente. Por ejemplo, puede asignarse un peso mayor a 10 m/s que a 20 m/s. El sistema de amortiguación puede usar el peso correspondiente a las distribuciones de viento actuales para generar el valor de referencia de paso. Por tanto, al determinar la amplitud del valor de referencia de paso, el sistema de amortiguación tiene en cuenta la cantidad de tiempo que se espera que la turbina esté sometida a esa velocidad de viento a lo largo de su vida útil para determinar la amplitud del valor de referencia de paso. Como tal, en algunos escenarios, el valor de referencia de paso puede tener un valor mayor cuando la velocidad de viento actual es de 10 m/s que cuando la velocidad de viento es de 20 m/s.

Las realizaciones en el presente documento pueden proporcionar una relación entre reducir la carga de fatiga sobre la torre y provocar un desgaste sobre el sistema de regulación de paso de pala. Dicho de otro modo, debido a que las oscilaciones de torre detectadas por el sistema de amortiguación de torre se reducen usando el sistema de regulación de paso de pala, las técnicas descritas en el presente documento optimizan esta relación de modo que el sistema de regulación de paso de pala se use de manera eficiente para reducir las oscilaciones de torre, minimizando de este modo tanto la carga por fatiga de torre como el desgaste sobre el sistema de regulación de paso de pala. Por ejemplo, usando una métrica que está desvinculada de la estrategia de activación, el sistema de amortiguación puede evitar bucles de retroalimentación que reducen la efectividad del sistema. Además, usando una distribución de viento que define la cantidad de tiempo que se espera que la turbina se haga funcionar a diversas velocidades de viento, el sistema de amortiguación puede accionar el sistema de regulación de paso de pala de la manera más dura a las velocidades de viento que provocan el mayor daño a la torre.

Realizaciones a modo de ejemplo

La figura 1 ilustra una vista diagramática de un generador de turbina eólica de eje horizontal 100. El generador de turbina eólica 100 normalmente comprende una torre 102 y una góndola de turbina eólica 104 ubicada en la parte superior de la torre 102. Un rotor de turbina eólica 106 puede conectarse con la góndola 104 a través de un árbol de baja velocidad que se extiende fuera de la góndola 104. El rotor de turbina eólica 106 comprende tres palas de rotor 108 montadas sobre un buje común 110 que rotan en un plano de rotor, pero puede comprender cualquier número adecuado de palas, como una, dos, cuatro, cinco o más palas. La pala 108 (o superficie aerodinámica) normalmente tiene una forma aerodinámica con un borde de ataque 112 para orientarse hacia el viento, un borde de salida 114 en el extremo opuesto de la cuerda para la pala 108, una punta 116 y una raíz 118 para unirse al buje 110 de cualquier manera adecuada.

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

La figura 2 ilustra una vista diagramática de componentes típicos internos de la góndola 104 y la torre 102 de un generador de turbina eólica 100. Cuando el viento 200 empuja sobre las palas 108, el rotor 106 gira y rota un árbol de baja velocidad 202. Los engranajes en una caja de engranajes 204 convierten mecánicamente la baja velocidad de rotación del árbol de baja velocidad 202 en una velocidad de rotación relativamente alta de un árbol de alta velocidad 208 adecuado para generar electricidad usando un generador 206.

Un controlador 210 puede detectar la velocidad de rotación de uno o ambos de los árboles 202, 208. Si el controlador decide que el/los árbol(es) están rotando demasiado rápido, el controlador puede indicar a un sistema de frenado 212 que ralentice la rotación de los árboles, lo que ralentiza la rotación del rotor 106, es decir, reduce las revoluciones por minuto (RPM). El sistema de frenado 212 puede evitar daños a los componentes del generador de turbina eólica 100. El controlador 210 también puede recibir entradas de un anemómetro 214 (que proporciona velocidad de viento) y/o una veleta 216 (que proporciona dirección de viento). Basándose en la información recibida, el controlador 210 puede enviar una señal de control a una o más de las palas 108 en un esfuerzo por ajustar el paso 218 de las palas. Al ajustar el paso 218 de las palas con respecto a la dirección de viento, la velocidad de rotación del rotor (y, por lo tanto, los árboles 202, 208) puede aumentarse o reducirse. Basándose en la dirección de viento, por ejemplo, el controlador 210 puede enviar una señal de control a un conjunto que comprende un motor de guiñada 220 y una unidad de guiñada 222 para rotar la góndola 104 con respecto a la torre 102, de manera que el rotor 106 puede situarse para orientarse más (o, en determinadas circunstancias, menos) a barlovento.

La figura 3 es un gráfico 300 que ilustra las relaciones entre la aceleración de torre y la carga de fatiga sobre la torre, según una realización descrita en el presente documento. El gráfico 300 ilustra la relación entre la carga de torre (eje Y) mostrada como un porcentaje de la carga máxima que la torre está diseñada para soportar y la aceleración de la torre (eje X). Por ejemplo, la turbina eólica puede incluir uno o más acelerómetros ubicados en la turbina (por ejemplo, en la góndola o torre). Un sistema de amortiguación de torre puede usar las aceleraciones medidas para detectar oscilaciones de torre. Las O del gráfico 300 ilustran una línea de base que correlaciona las aceleraciones de torre medidas que van a cargarse sobre la torre cuando no se usa ningún sistema de amortiguación de torre. Como se muestra, estas marcas crean una relación sustancialmente lineal entre la aceleración y la carga, es decir, a medida

que aumenta la aceleración medida, la carga sobre la torre aumenta, y viceversa. Por el contrario, las X del gráfico 300 ilustran puntos de funcionamiento de un sistema de amortiguación que usa las aceleraciones de torre medidas para controlar directamente el valor de referencia de paso usado para cambiar el paso de las palas sobre el rotor. Específicamente, el gráfico 300 ilustra el efecto del bucle de retroalimentación descrito anteriormente, donde el sistema de amortiguación aumenta la amplitud del valor de referencia de paso, lo que disminuye las aceleraciones de torre. En respuesta a una disminución de las aceleraciones de torre, el sistema de amortiguación disminuye el valor de referencia de paso, lo que permite que las oscilaciones en la turbina vuelvan a aumentar (suponiendo que la fuente de las oscilaciones de torre siga presente). El aumento en la aceleración de torre provoca que el sistema de amortiguación de torre aumente de nuevo el valor de referencia de paso. En una realización, el ajuste del sistema de control puede ayudar a mitigar los efectos de este bucle de retroalimentación, por ejemplo, cambiando la amplitud de paso muy lentamente para reducir los efectos de la retroalimentación. Sin embargo, si la amplitud de paso cambia lentamente, en algunos escenarios esto puede provocar una carga de torre más alta y en otros escenarios puede provocar una carga de sistema de paso más alta que se necesita para amortiguar oscilaciones. Sin embargo, al retirar la retroalimentación, el controlador puede establecer la amplitud al nivel necesario y cambiar este valor cuando cambia la carga de torre.

El bucle de retroalimentación surge porque la métrica usada para calcular el valor de referencia de paso (por ejemplo, aceleración de torre) está vinculada a la estrategia de activación usada por el sistema de amortiguación de torre (es decir, se ve afectada por el cambio en el ángulo de paso de pala). En una realización, para mitigar los efectos del bucle de retroalimentación, el sistema de amortiguación usa una métrica desvinculada para controlar el valor de referencia de paso, es decir, una métrica que no se ve afectada por la estrategia de activación. En un ejemplo, el bucle de retroalimentación estima el empuje del rotor en ausencia del sistema de amortiguación. Es decir, aunque los cambios con respecto al valor de referencia de paso también cambian el empuje de rotor, el empuje de rotor se estima como si este cambio no se hubiera producido. De esta manera, el empuje de rotor estimado está desvinculado, o es independiente, del sistema de amortiguación. Como se describirá en más detalle a continuación, usar el empuje de rotor estimado para generar el valor de referencia de paso permite al sistema de amortiguación tener una respuesta más lineal entre la carga de torre y la señal de activación emitida por el sistema de amortiguación de torre, aunque esto no es un requisito.

En otra realización, para mitigar los efectos del bucle de retroalimentación, el sistema de amortiguación puede usar una métrica que se mide mediante un sensor sobre la turbina eólica, por ejemplo, un indicador de tensión sobre la torre. Al igual que con el empuje de rotor, el sistema de amortiguación puede realizar un cálculo para desvincular la fuerza medida de los efectos del sistema de amortiguación, es decir, estimar el valor de la fuerza como si el sistema de amortiguación estuviera inactivo o no estuviera presente. El sistema de amortiguación puede usar la métrica desvinculada para controlar el valor de referencia de paso y retirar el bucle de retroalimentación o al menos mitigar los efectos de los bucles.

La figura 4 es un gráfico 400 que ilustra relaciones entre la velocidad de viento y la carga de fatiga sobre la torre, según una realización descrita en el presente documento. El gráfico 400 muestra un problema diferente al de la figura 3. En el presente documento, la carga de fatiga de torre se muestra como que es dependiente de la velocidad de viento. Por ejemplo, el gráfico 400 ilustra que el sistema de amortiguación puede ser más activo a algunas velocidades de viento que no provocan daños significativos a la turbina eólica, pero menos activo a velocidades de viento que provocan daños significativos.

Una vez más, las O representan una relación de línea de base entre la velocidad de viento y la carga de fatiga cuando no hay ningún sistema de amortiguación que esté activo, mientras que las X representan los puntos de funcionamiento cuando el sistema de amortiguación está activo, es decir, donde el sistema de amortiguación aumenta el valor de referencia de paso a medida que aumenta la aceleración medida. Específicamente, el gráfico 400 incluye un círculo 405 a la velocidad de viento nominal de esta turbina eólica particular (por ejemplo, 10m/s). En el presente documento, el sistema de amortiguación correlaciona una carga de fatiga de torre inferior a la línea de base y, por tanto, tendrá un valor de referencia de paso menor. Debido a que las cargas de cojinete de paso se calculan como la integral del momento resultante sobre el cojinete al cubo y se multiplican por la tasa de paso, cerca de la velocidad de viento nominal (10 m/s) el empuje está en un máximo, y por tanto, genera mucho desgaste para usar el sistema de paso a estas velocidades. A medida que aumenta la velocidad de viento, el sistema de amortiguación detecta una mayor carga de fatiga y, por tanto, emite un valor de referencia de paso con una gran amplitud, es decir, acciona el sistema de paso de pala de manera más dura. Sin embargo, esta estrategia de control no tiene en cuenta la longitud de tiempo que una turbina puede someterse a las diversas velocidades de viento. En el gráfico 400, el sistema de amortiguación correlaciona un aumento de velocidad de viento con un aumento de carga de torre. Aunque la carga aumenta generalmente con la velocidad de viento, la fatiga experimentada por la torre también depende de cuánto tiempo la turbina experimenta esa velocidad de viento particular. Si la turbina está en una ubicación donde se hace funcionar a la velocidad de viento nominal mucho más a menudo que las velocidades de viento más altas, por ejemplo, mayores de 20 m/s, una estrategia más eficiente puede ser accionar el sistema de paso de pala de manera más dura a la velocidad nominal del viento que a las velocidades de viento más altas.

La figura 5 es un gráfico 500 que ilustra distribuciones de daños respectivas para la torre y el sistema de regulación de paso a diversas velocidades de viento, según una realización descrita en el presente documento. El gráfico 500

ilustra distribuciones de daños de la torre y el sistema de paso de pala cuando se hace funcionar según el sistema de amortiguación comentado en la figura 4. La distribución de daños de la torre se muestra por las barras rayadas, mientras que la distribución de daños del sistema de pala de paso se muestra por las barras completas. Como ilustran las barras rayadas, el mayor porcentaje de daños provocado por oscilaciones de torre se produce cuando la turbina está haciéndose funcionar cerca de la velocidad de viento nominal, por ejemplo, velocidades de viento entre 8-16 m/s. De hecho, muy pocos de los daños experimentados por la torre se producen a velocidades de viento más altas, por ejemplo, velocidades superiores a 18 m/s. Esto refleja el hecho de que la turbina eólica, al menos en esta ubicación, se hace funcionar cerca de la velocidad de viento nominal mucho más a menudo que a las velocidades de viento más altas.

Sin embargo, las barras completas ilustran que la distribución de daños del sistema de paso de pala (es decir, el desgaste sobre el sistema de paso de pala) no coincide con la distribución de daños de la torre. Esto indica que el sistema de paso de pala está usándose de manera ineficiente dado que se acciona de manera más dura a velocidades de viento más altas (lo que provoca un mayor desgaste sobre el sistema de pala) a pesar de que se hace relativamente poco daño a la torre a estas velocidades en comparación con velocidades de viento inferiores a 16 m/s. Por ejemplo, casi el sesenta por ciento del daño experimentado por una torre a lo largo de su vida útil se produce a velocidades de viento entre 12-16 m/s, sin embargo, solo alrededor del cincuenta por ciento del daño al sistema de paso de pala se produce a estas velocidades. Por otra parte, cerca de la velocidad de viento nominal (10 m/s) hay un gran coste al usar el sistema de regulación de paso para reducir las oscilaciones de torre. Mientras que solo el 11 o el 12 por ciento del daño a la torre se produce a esta velocidad, más del 25 por ciento del daño al sistema de regulación de paso se produce a esta velocidad. Por tanto, el gráfico 500 indica que un sistema de amortiguación que tiene en cuenta la cantidad de tiempo que una turbina eólica se somete a diversas velocidades de viento puede ser más eficiente en el control del sistema de paso de pala que un sistema de amortiguación que solo tiene en cuenta mediciones en tiempo real, como las aceleraciones de torre o la velocidad de viento actual en la turbina.

La figura 6 es un diagrama de bloques de un controlador de turbina eólica 210, según una realización descrita en el presente documento. El controlador 210 incluye un procesador 605 y una memoria 610. El procesador 605 representa uno o más elementos de procesamiento que cada uno puede incluir uno o más núcleos de procesamiento. La memoria 610 puede incluir memoria volátil, memoria no volátil o una combinación de ambas. Además, el controlador 210 puede ubicarse en la turbina 100 como se muestra en la figura 2 o puede ubicarse de manera remota con respecto a la turbina (por ejemplo, como parte de un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA)).

La memoria 610 incluye un sistema de amortiguación de torre 615 y un controlador de paso de pala 635. El sistema de amortiguación de torre 615 puede ser o bien un sistema de FATD o un sistema de SSTD como se ha descrito anteriormente. El sistema 615 incluye un estimador de fuerza 620 y una distribución de viento 630. El estimador de fuerza 620 estima una fuerza ejercida sobre la torre de la turbina como si el sistema de amortiguación de torre 615 estuviera inactivo u omitido. En una realización, el estimador de fuerza 620 estima el empuje de rotor en ausencia de cualquier actividad de amortiguación de torre. Es decir, a pesar de que el sistema de amortiguación de torre 615 genera señales de control que cambian el paso de pala, cambiando de ese modo el empuje sobre el rotor, el estimador de fuerza 620 determina cuál sería el empuje de rotor como si el paso de la pala no se cambiara por el sistema de amortiguación de torre 615. A continuación se muestra una ecuación que puede usarse para estimar el empuje de rotor:

$$F_{TC} = F_T + \frac{\partial F_T}{\partial \theta} \Delta \theta_{SALIDA} \quad (1)$$

En la ecuación 1, F_{TC} es la fuerza de empuje compensada como si el sistema de amortiguación de torre 615 estuviera inactivo. Para determinar esta fuerza, el estimador de fuerza 620 combina la fuerza de empuje instantánea estimada F_T con el empuje de rotor provocado por el cambio en el valor de referencia de paso generado por el sistema de

amortiguación de torre 615 (es decir, $\frac{\partial F_T}{\partial \theta} \Delta \theta_{SALIDA}$). Dicho de manera diferente, la ecuación 1 representa la estimación del empuje de rotor actual F_T y la compensación de la parte del empuje de rotor actual atribuido a las señales de control (es decir, valor de referencia de paso) emitidas por el sistema de amortiguación de torre 615. Una vez que se realiza esta compensación, la fuerza restante F_{TC} es la fuerza que habría sobre el rotor si el sistema de amortiguación de torre 615 estuviera inactivo.

Para estimar la fuerza de empuje instantánea F_T , el estimador de fuerza 620 puede incluir una herramienta o aplicación de simulación que usa el ángulo de paso de pala actual y la velocidad de la punta de pala para estimar el empuje actual sobre el rotor. Por ejemplo, la herramienta de simulación puede usar un modelo de pala bidimensional que genera la fuerza de empuje instantánea F_T usando el ángulo de paso de pala y la velocidad de punta como entradas. De manera alternativa, la turbina puede incluir uno o más sensores que permitan al estimador de fuerza 620 medir la fuerza instantánea sobre el rotor directamente en lugar de usar una herramienta de simulación para estimar esta fuerza.

Para estimar el empuje atribuible al sistema de amortiguación de torre 615 (es decir, $\frac{\partial F_T}{\partial \theta} \Delta \theta_{SALIDA}$), el estimador de fuerza 620 determina el cambio en el empuje de rotor provocado por el valor de referencia de paso que se emite de manera actual por el sistema de amortiguación de torre 615. Por ejemplo, el estimador de fuerza 620 puede incluir una tabla de consulta que proporcione el cambio en el empuje de rotor correspondiente a un conjunto de valores de referencia de paso. Una vez que el efecto del sistema de amortiguación de torre 615 se retira del empuje de rotor instantáneo F_T , la fuerza restante es la fuerza de empuje compensada F_{TC} . Esta fuerza representa el empuje sobre el rotor como si el sistema de amortiguación de torre 615 estuviera inactivo.

Al estimar el empuje de rotor en ausencia del sistema de amortiguación de torre 615, la fuerza de empuje instantánea compensada F_{TC} se desvincula del sistema 615. Es decir, la ecuación 1 da como resultado una fuerza que no es dependiente de los cambios en empuje provocados por el sistema de amortiguación de torre 615. Por ejemplo, la fuerza F_{TC} en su lugar puede depender de la turbulencia de viento actual u otros casos que pueden provocar oscilaciones en la torre. Por tanto, al usar la fuerza F_{TC} como una señal de control, el sistema de amortiguación de torre 615 puede evitar o mitigar los efectos del bucle de retroalimentación mencionados anteriormente (y mostrados en la figura 3). Por ejemplo, si la turbulencia de viento es alta, entonces la fuerza F_{TC} será alta. Aunque el sistema de amortiguación de torre 615 aumente la amplitud del valor de referencia de paso en respuesta a un aumento de la fuerza F_{TC} , este cambio en el valor de referencia de paso no cambia la fuerza F_{TC} porque cualquier efecto sobre el empuje de rotor se retira como se muestra en la ecuación 1, es decir, la fuerza F_{TC} se desvincula del sistema de amortiguación de torre 615. Por tanto, usar la fuerza F_{TC} evita un bucle de retroalimentación donde la salida del sistema de amortiguación de torre 615 también afecta a su entrada.

La figura 7 es un gráfico 700 que ilustra relaciones entre un recuento de flujo de lluvia del empuje desvinculado estimado y carga de fatiga sobre la torre, según una realización descrita en el presente documento. El gráfico 700 ilustra la relación entre la carga de torre (eje Y) y el recuento de flujo de lluvia, que es una técnica para calcular la carga de fatiga (eje X). Las O del gráfico 700 ilustran una línea de base que correlaciona el empuje de rotor medido con la carga sobre la torre cuando no está usándose ningún sistema de amortiguación de torre. Como se muestra, estas marcas crean una relación sustancialmente lineal entre el empuje y la carga. Las X del gráfico 700 ilustran el uso de un sistema de amortiguación de torres sin ninguna compensación por los efectos del bucle de retroalimentación descrito anteriormente.

Volviendo a la figura 6, en lugar de estimar una fuerza sobre el rotor, el estimador de fuerza 620 puede determinar una fuerza asociada a la torre para identificar la carga de fatiga sobre la torre. Por ejemplo, la turbina eólica puede incluir un indicador de tensión ubicado sobre la torre. Al usar los datos proporcionados por el indicador de tensión, el estimador de fuerza 620 determina el valor de la fuerza como si el sistema de amortiguación de torre 615 estuviera inactivo. Por ejemplo, si el indicador de tensión mide una fuerza o un momento de flexión en la torre, el estimador de fuerza 620 estima esta fuerza como si el sistema de amortiguación de torre 615 no estuviera emitiendo activamente una señal de control para reducir las oscilaciones de torre. Por tanto, al igual que el empuje de rotor descrito anteriormente, la fuerza estimada se desvincula del sistema de amortiguación de torre y puede usarse como señal de control para estimar una carga de fatiga de torre.

El sistema de amortiguación de torre 615 también incluye la distribución de viento 630, que contiene valores de tiempo históricos o estimados a diferentes velocidades de viento. Por ejemplo, la distribución de viento 630 puede estimarse basándose en un estudio de viabilidad de un sitio de turbina eólica potencial (cuando las turbinas aún no se han instalado). Al usar las mediciones adquiridas durante el estudio, la distribución de viento 630 identifica qué parte o porcentaje de tiempo se someten las turbinas eólicas en el sitio a diversas velocidades de viento. En una realización, la distribución de viento 630 puede indicar el porcentaje esperado que la turbina está sometida a una determinada velocidad de viento a lo largo de su vida útil, por ejemplo, se espera que la turbina esté sometida a velocidades de viento de 10 m/s durante el 30 % de su vida útil.

En una realización, la distribución de viento 630 cambia o se ajusta basándose en actualizar los datos de viento medidos en la turbina eólica. La turbina eólica (o el parque eólico) puede incluir sensores que continúan midiendo la velocidad de viento. Estos datos pueden usarse para cambiar una distribución original o inicial de las velocidades de viento. Por ejemplo, el sistema de amortiguación de torre 615 puede prever cómo las velocidades de viento previamente medidas distribuirían el viento a lo largo de la vida útil de la turbina. Sin embargo, debido a que las nuevas velocidades de viento medidas pueden cambiar esa previsión, el sistema de amortiguación de torre 615 puede actualizar la distribución de viento 630 para reflejar mejor los datos medidos.

Independientemente de cómo se genere la distribución de viento 630, en una realización, el sistema de amortiguación de torre 615 usa la distribución 630 para pesar la señal de control (por ejemplo, valor de referencia de paso) usada para amortiguar las oscilaciones de la torre. Haciendo referencia de nuevo a la figura 5, el gráfico 500 ilustra que la mayoría del daño provocado a la torre se produce a velocidades de viento cerca de 10-14m/s. Una estrategia de control que aumenta la amplitud de la señal de control a medida que aumenta la velocidad de viento (es decir, cuanto más alta es la velocidad de viento, mayor es la amplitud de la señal de control) puede usar el sistema de paso de pala de manera menos eficiente que una estrategia de control que tiene en cuenta la longitud de tiempo que la turbina pasa a las diversas velocidades de viento. Por tanto, el sistema de amortiguación de torre 615 usa la distribución de viento

630 para escalar la señal de control. Por ejemplo, el sistema 615 puede accionar de manera más dura el sistema de paso de pala (por ejemplo, aumentar la amplitud de la señal de control) cuando la turbina se somete actualmente a las velocidades de viento a las que se asigna el mayor peso en la distribución 630. Por tanto, en algunos escenarios, el sistema de amortiguación de torre 615 puede emitir un valor de referencia de paso de amplitud mayor a bajas velocidades de viento que a altas velocidades de viento.

El controlador de paso de pala 635 recibe el valor de referencia de paso emitido por el sistema de amortiguación de torre 615. Aunque no se muestra, el controlador de paso de pala 635 se vincula comunicativamente a uno o más actuadores de paso de pala sobre el rotor que cambian el ángulo de paso de pala. Al ajustar el ángulo de paso de pala, el controlador de paso de pala 635 puede usar otras entradas además del valor de referencia de paso recibido del sistema de amortiguación de torre 615. Por ejemplo, el ángulo de paso de pala también puede ajustarse según la velocidad de viento actual o una salida de potencia deseada solicitada por un operador de red. Estos factores pueden entonces combinarse para ajustar el ángulo de paso de pala sobre las palas en el rotor. En una realización, el valor de referencia de paso recibido del sistema de amortiguación de torre 615 puede usarse como un valor de desplazamiento para la regulación de paso de las palas. Por ejemplo, el valor de referencia de paso puede dar instrucciones al controlador de paso de pala 635 para que oscile el ángulo de paso de pala actual en un 2 % a una determinada frecuencia para amortiguar una oscilación de torre. A medida que aumenta la amplitud del valor de referencia de paso, el cambio en el paso de pala también puede aumentar, por ejemplo, de un cambio del 2 % a un cambio del 4 % en el ángulo de paso de pala actual. Aunque las realizaciones en el presente documento describen el uso de un sistema de amortiguación de torre que emite una señal de control (por ejemplo, el valor de referencia de paso) para un controlador de paso de pala, la presente divulgación no se limita a tal.

La figura 8 es un flujo 800 para determinar un valor de paso de pala para reducir las oscilaciones en una turbina eólica, según una realización descrita en el presente documento. En una realización, el flujo 800 ilustra la lógica de control realizada por el sistema de amortiguación de torre 615. Como se muestra, el flujo 800 recibe condiciones de viento y el empuje de rotor compensado F_{TC} como entradas. Las condiciones de viento pueden ser la velocidad de viento medida en la turbina eólica, una velocidad de viento medida por un sensor a barlovento de la turbina, o una velocidad de viento derivada estimada a partir de otros factores. Las condiciones de viento se proporcionan entonces a la distribución de viento 630 que emite un peso 805 para la velocidad de viento particular. Como se muestra, la distribución de viento 630 ilustra una curva de campana donde los mayores valores de peso corresponden a las velocidades de viento más comunes, o se indican de manera diferente, las velocidades de viento a las que más se hace funcionar la turbina eólica. Asignar los mayores pesos a las velocidades de viento más frecuentes puede basarse en los datos ilustrados en la figura 5, donde la mayor parte del daño de torre se produce a las velocidades de viento más comunes, por ejemplo, 10-14m/s.

El flujo 800 ilustra la introducción del empuje de rotor compensado F_{TC} en una distribución de fatiga de torre 807, que se usa por el sistema de amortiguación de torre para asignar un peso al empuje. Aunque se muestra un empuje de rotor, el flujo 800 puede usar cualquier señal de control que esté desvinculada del sistema de amortiguación de torre. Por ejemplo, el flujo 800 puede usar una fuerza de flexión medida en la torre, siempre y cuando la fuerza se compense para retirar cualquier efecto provocado por el sistema de amortiguación de torre. La distribución de fatiga de torre 807 correlaciona el valor del empuje de rotor compensado con un recuento de flujo de lluvia (F_{TCFAT}) que estima la fatiga sobre la torre. En el presente documento, la relación es lineal donde la carga de fatiga sobre la torre aumenta a medida que aumenta el empuje de rotor, es decir, cuanto mayor es el empuje, mayor fatiga sobre la torre. La distribución de fatiga de torre 807 incluye una pluralidad de pesos que corresponden a los diferentes empujes de rotor. Una vez que se encuentra una coincidencia, el flujo 800 emite un peso 810 que representa la cantidad de fatiga de torre provocada por el empuje de rotor compensado.

El peso 805 seleccionado de la distribución de viento 630 y el peso 810 seleccionado de la distribución de fatiga de torre 807 se combinan por el multiplicador 815 para obtener un peso combinado 820. Por tanto, el peso 820 se deriva tanto de la distribución de viento 630 que tiene en cuenta la cantidad de tiempo que se espera que la turbina eólica se haga funcionar en diversas velocidades de viento y la distribución de fatiga de torre 807 que selecciona un peso usando una señal de control desvinculada de la estrategia de activación usada por el sistema de amortiguación de torre.

El flujo 800 incluye un estimador de paso de pala 830 que emite un cambio en el paso de pala ($\Delta\theta$) 835 usando una o más entradas. En este ejemplo, el cambio de paso de pala 835 puede basarse en las aceleraciones de torre como se mencionó anteriormente. Es decir, a medida que la torre se acelera, el estimador de paso de pala 830 puede aumentar el cambio de paso de pala 835. En una realización, el cambio de paso de pala 835 puede ser una señal sinusoidal que incluye señales a una o más frecuencias. El estimador de paso de pala 830 puede ajustar la frecuencia y amplitud de la señal sinusoidal según cambios en las aceleraciones de torre. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las aceleraciones de torre se vinculan al sistema de amortiguación de viento de manera que los cambios con respecto al paso de pala afectan a las aceleraciones de torre. Por tanto, el flujo 800 incluye un multiplicador 825 que combina el cambio de paso de pala 835 con el peso combinado 820. Al hacerlo, da como resultado un cambio de paso de pala compensado ($\Delta\theta_{SALIDA}$) 840, que es la salida del sistema de amortiguación de torre (es decir, el valor de referencia de paso). El cambio de paso de pala compensado 840 se proporciona al controlador de paso de pala 635 que usa este cambio para reducir oscilaciones de torre.

La combinación del cambio de paso de pala 835 con el peso combinado 820 logra al menos dos beneficios. En primer lugar, el cambio de paso de pala compensado 840 se deriva usando una señal de control (es decir, el empuje de rotor compensado) que se desvincula del sistema de amortiguación de torre. Esto minimiza el efecto de usar una señal de control que se vincula al sistema de amortiguación de torre, como aceleraciones de torre, al generar el cambio de paso de pala 835. En segundo lugar, la salida del sistema de amortiguación de torre se ajusta usando la distribución de viento 630. Es decir, el cambio de paso de pala compensado 840 cambia según la cantidad de tiempo que se espera que la turbina se someta a esa velocidad de viento a lo largo de su vida útil. Hacerlo de este modo puede dar como resultado un uso más eficiente del sistema de regulación de paso de pala en relación con una estrategia de control que no tiene en cuenta la longitud de tiempo que se espera que la turbina se haga funcionar a una velocidad de viento dada.

En lo anterior, se hizo referencia a realizaciones presentadas en esta divulgación. Sin embargo, el alcance de la presente divulgación no está limitada a realizaciones específicas descritas. Por el contrario, cualquier combinación de las características y elementos, estén relacionados o no con diferentes realizaciones, se contempla para implementar y poner en práctica las realizaciones contempladas. Además, aunque las realizaciones dadas a conocer en el presente documento pueden lograr ventajas con respecto a otras posibles soluciones o con respecto a la técnica anterior, el hecho de que una ventaja particular se logre o no mediante una realización dada no es limitante del alcance de la presente divulgación. Por tanto, los aspectos, características, realizaciones y ventajas en el presente documento son meramente ilustrativos y no se tienen en cuenta elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se mencionen explícitamente en una(s) reivindicación/reivindicaciones. Asimismo, la referencia a "la invención" no se interpretará como una generalización de ninguna materia objeto inventiva dada a conocer en el presente documento y no se tendrá en cuenta que sea un elemento o limitación de las reivindicaciones adjuntas, salvo que se mencione explícitamente en una(s) reivindicación/reivindicaciones.

Como se apreciará por un experto en la técnica, las realizaciones dadas a conocer en el presente documento pueden incorporarse como un sistema, método o producto de programa informático. Por consiguiente, los aspectos pueden adoptar la forma de una realización de hardware completa, una realización completa de software (que incluye firmware, software residente, microcódigo, etc.) o una realización que combina aspectos de software y hardware que generalmente todos pueden denominarse en el presente documento como un "circuito", "módulo" o "sistema". Además, los aspectos pueden adoptar la forma de un producto de programa informático incorporado en uno o más medio(s) legible(s) por ordenador que tienen código de programa legible por ordenador incorporado en el/los mismo(s).

La presente invención puede ser un sistema, un método y/o un producto de programa informático. El producto de programa informático puede incluir un medio (o medios) de almacenamiento legible por ordenador que tiene(n) instrucciones de programa legible por ordenador en el/los mismo(s) para que provoquen que un procesador lleve a cabo aspectos de la presente invención.

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

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

El código de programa incorporado en un medio legible por ordenador puede transmitirse usando cualquier medio apropiado, que incluye, pero no se limita a inalámbricas, por cable, cable de fibra óptica, RF, etc., o cualquier combinación adecuada de las anteriores.

El código de programa informático para llevar a cabo operaciones relacionadas con aspectos de la presente divulgación puede escribirse en cualquier combinación de uno o más lenguajes de programación, que incluyen un lenguaje de programación orientado a objetos como Java, Smalltalk, C++ o similares y lenguajes de programación

procedimental convencionales, como el lenguaje de programación "C" o lenguajes de programación similares. El código de programa puede ejecutarse por completo en el ordenador del usuario, en parte en el ordenador del usuario, como un paquete de software independiente, en parte en el ordenador del usuario y en parte en un ordenador remoto o por completo en el ordenador o servidor remoto. En este último escenario, el ordenador remoto puede conectarse al ordenador del usuario a través de cualquier tipo de red, que incluye una red de área local (LAN) o una red de área amplia (WAN), o la conexión puede hacerse a un ordenador externo (por ejemplo, a través de Internet usando un proveedor de servicios de Internet).

Aspectos de la presente divulgación se describen anteriormente con referencia a las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloques de métodos, aparatos (sistemas) y productos de programas informáticos según realizaciones presentadas en esta divulgación. Se entenderá que cada bloque de las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloque, y combinaciones de bloques en las ilustraciones de diagrama de flujo y/o diagramas de bloque, puede implementarse por instrucciones de programa informático. Estas instrucciones de programa informático pueden proporcionarse a un procesador de un ordenador de propósito general, un ordenador de propósito especial, u otro aparato de procesamiento de datos programable para producir una máquina, de manera que las instrucciones, que se ejecutan a través del procesador del ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable, crear medios para la implementación de las funciones/actos especificados en el diagrama de flujo y/o bloque de diagrama de bloque o bloques.

Estas instrucciones de programa informático también pueden almacenarse en un medio legible por ordenador que puede dirigir un ordenador, otro aparatos programables de procesamiento de datos u otros dispositivos para funcionar de una manera particular, de manera que las instrucciones almacenadas en el medio legible por ordenador producen un artículo de fabricación, que incluyen instrucciones que implementan la función/acto especificado en el diagrama de flujo y/o bloque de diagrama de bloque o bloques.

Las instrucciones de programa informático también pueden cargarse en un ordenador, otros aparatos programables de procesamiento de datos u otros dispositivos para hacer que se realicen una serie de etapas de funcionamiento en el ordenador, otros aparatos programables u otros dispositivos para producir un proceso implementado en ordenador de manera que las instrucciones que se ejecutan en el ordenador u otros aparatos programables proporcionan procesos para la implementación de las funciones/actos especificados en el diagrama de flujo y/o bloque de diagrama de bloque o bloques.

El diagrama de flujo y los diagramas bloque en las figuras ilustran la arquitectura, funcionalidad y funcionamiento de posibles implementaciones de sistemas, métodos y productos de programa informático según diversas realizaciones. En este sentido, cada bloque en el diagrama de flujo o diagramas de bloque puede representar un módulo, segmento o parte de código, que comprende una o más instrucciones ejecutables para implementar la(s) función/funciones lógica(s) especificada(s). También debe indicarse que, en algunas implementaciones alternativas, las funciones indicadas en el bloque pueden producirse fuera del orden indicado en las figuras. Por ejemplo, dos bloques mostrados en sucesión pueden, de hecho, ejecutarse de manera sustancialmente simultánea, o los bloques pueden ejecutarse a veces en el orden inverso, dependiendo de la funcionalidad implicada. También debe indicarse que cada bloque de los diagramas de bloques y/o ilustración de diagrama de flujo, y combinaciones de bloques en los diagramas de bloque y/o ilustración de diagrama de flujo, puede implementarse por sistemas basados en hardware de propósito especial que realizan las funciones o actos especificados, o combinaciones de hardware de propósito especial e instrucciones informáticas.

En vista de lo anterior, el alcance de la presente divulgación está determinado por las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Un método (800) de funcionamiento de una turbina eólica, comprendiendo el método:
 - 5 determinar un valor de peso de fatiga de torre (810) basándose en una fuerza ejercida sobre la turbina eólica y una distribución de fatiga de torre (807), en el que la distribución de fatiga de torre correlaciona la fuerza ejercida sobre la turbina eólica con la carga de fatiga estimada provocada sobre una torre de la turbina eólica por esa fuerza ejercida;
 - 10 determinar un valor de peso de viento (805) basándose en condiciones de viento medidas y una distribución de viento (630), en el que la distribución de viento define la cantidad de tiempo que se espera que la turbina eólica se haga funcionar a diversas velocidades de viento;
 - 15 combinar (815) el valor de peso de fatiga de torre (810) y el valor de peso de viento (805) para obtener un valor de ganancia combinado (820); y
 - determinar (830, 825) un valor de accionamiento de paso (840) para amortiguar una oscilación en la turbina eólica basándose en el valor de ganancia combinado.
- 20 2. El método según la reivindicación 1, en el que la fuerza ejercida sobre la turbina eólica comprende un empuje sobre un rotor en la turbina eólica, en el que el empuje de rotor representa una fuerza sobre el rotor como si no se usara un sistema de amortiguación de torre para reducir la oscilación en la turbina eólica.
- 25 3. El método según la reivindicación 2, que comprende además:
 - determinar un empuje actual del rotor basándose en un ángulo de paso de una pala y una velocidad del rotor;
 - determinar un cambio en empuje sobre el rotor resultante del sistema de amortiguación de torre que reduce la oscilación en la turbina eólica; y
 - 30 determinar el empuje de rotor combinando el empuje actual del rotor y el cambio en empuje.
4. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que determinar el valor de peso de fatiga de torre comprende:
 - 35 correlacionar el empuje de rotor con la distribución de fatiga de torre para determinar el valor de peso de fatiga de torre.
- 40 5. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la distribución de viento (630) comprende una pluralidad de pesos, cada uno correspondiente a una velocidad de viento respectiva, en el que la pluralidad de pesos cambia en valor basándose en la cantidad de tiempo que se estima que la turbina eólica experimente la velocidad de viento correspondiente.
- 45 6. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:
 - recibir un cambio de paso de pala (835) de un sistema de amortiguación de torre;
 - ajustar (825) el cambio de paso de pala usando el valor de ganancia combinado para determinar el valor de accionamiento de paso; y
 - 50 transmitir el valor de accionamiento de paso a un controlador de paso de pala (635).
7. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la fuerza ejercida sobre la turbina eólica comprende una medición proporcionada por un indicador de tensión sobre la turbina eólica.
- 55 8. Un controlador de turbina eólica (210), que comprende:
 - un procesador (605); y
 - 60 un sistema de amortiguación de torre (615) vinculado al procesador, el sistema de amortiguación de torre está configurado para:
 - determinar un valor de peso de fatiga de torre (810) basándose en una fuerza ejercida sobre la turbina eólica y una distribución de fatiga de torre (807), en el que la distribución de fatiga de torre correlaciona la fuerza ejercida sobre la turbina eólica con la carga de fatiga estimada provocada sobre una torre de la turbina eólica por esa fuerza ejercida,
 - 65

- determinar un valor de peso de viento (805) basándose en las condiciones de viento medidas y una distribución de viento (630), en el que la distribución de viento define la cantidad de tiempo que se espera que la turbina eólica se haga funcionar a diversas velocidades de viento,
- 5 combinar (815) el valor de peso de fatiga de torre (810) y el valor de peso de viento (805) para obtener un valor de ganancia combinado (820), y
- 10 determinar (830, 825) un valor de accionamiento de paso para amortiguar una oscilación en la turbina eólica basándose en el valor de ganancia combinado.
9. El controlador de turbina eólica según la reivindicación 8, en el que la fuerza ejercida sobre la turbina eólica comprende un empuje sobre un rotor en la turbina eólica, en el que el empuje de rotor representa una fuerza sobre el rotor como si no se usara un sistema de amortiguación de torre para reducir la oscilación en la turbina eólica.
- 15 10. El controlador de turbina eólica según la reivindicación 9, en el que el sistema de amortiguación de torre está configurado para:
- 20 determinar un empuje actual del rotor basándose en un ángulo de paso de una pala y una velocidad del rotor;
- determinar un cambio en empuje sobre el rotor resultante del sistema de amortiguación de torre que reduce la oscilación en la turbina eólica; y
- 25 determinar el empuje de rotor combinando el empuje actual del rotor y el cambio en empuje.
11. El controlador de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que determinar el valor de peso de fatiga de torre comprende:
- 30 correlacionar el empuje de rotor con la distribución de fatiga de torre para determinar el valor de peso de fatiga de torre.
12. El controlador de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la distribución de viento comprende una pluralidad de pesos, cada uno correspondiente a una velocidad de viento respectiva, en el que la pluralidad de pesos cambia en valor basándose en la cantidad de tiempo que se estima que la turbina eólica experimente la velocidad de viento correspondiente.
- 35 13. El controlador de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el sistema de amortiguación de torre está configurado para:
- 40 determinar un cambio de paso de pala;
- ajustar el cambio de paso de pala usando el valor de ganancia combinado para determinar el valor de accionamiento de paso; y
- 45 transmitir el valor de accionamiento de paso a un controlador de paso de pala.
14. El controlador de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la fuerza ejercida sobre la turbina eólica comprende una medición proporcionada por un indicador de tensión sobre la turbina eólica.
- 50 15. Un medio de almacenamiento no transitorio legible por ordenador que almacena código de programa legible por ordenador que, al ejecutarse en un procesador, realiza una operación, comprendiendo la operación:
- 55 determinar un valor de peso de fatiga de torre (810) basándose en una fuerza ejercida sobre la turbina eólica y una distribución de fatiga de torre (807), en el que la distribución de fatiga de torre correlaciona la fuerza ejercida sobre la turbina eólica con la carga de fatiga estimada provocada sobre una torre de la turbina eólica por esa fuerza ejercida;
- 60 determinar un valor de peso de viento (805) basándose en condiciones de viento medidas y una distribución de viento (630), en el que la distribución de viento define la cantidad de tiempo que se espera que la turbina eólica se haga funcionar a diversas velocidades de viento;
- 65 combinar (815) el valor de peso de fatiga de torre (810) y el valor de peso de viento (805) para obtener un valor de ganancia combinado (820); y

determinar (830, 825) un valor de accionamiento de paso (840) para amortiguar una oscilación en la turbina eólica basándose en el valor de ganancia combinado.

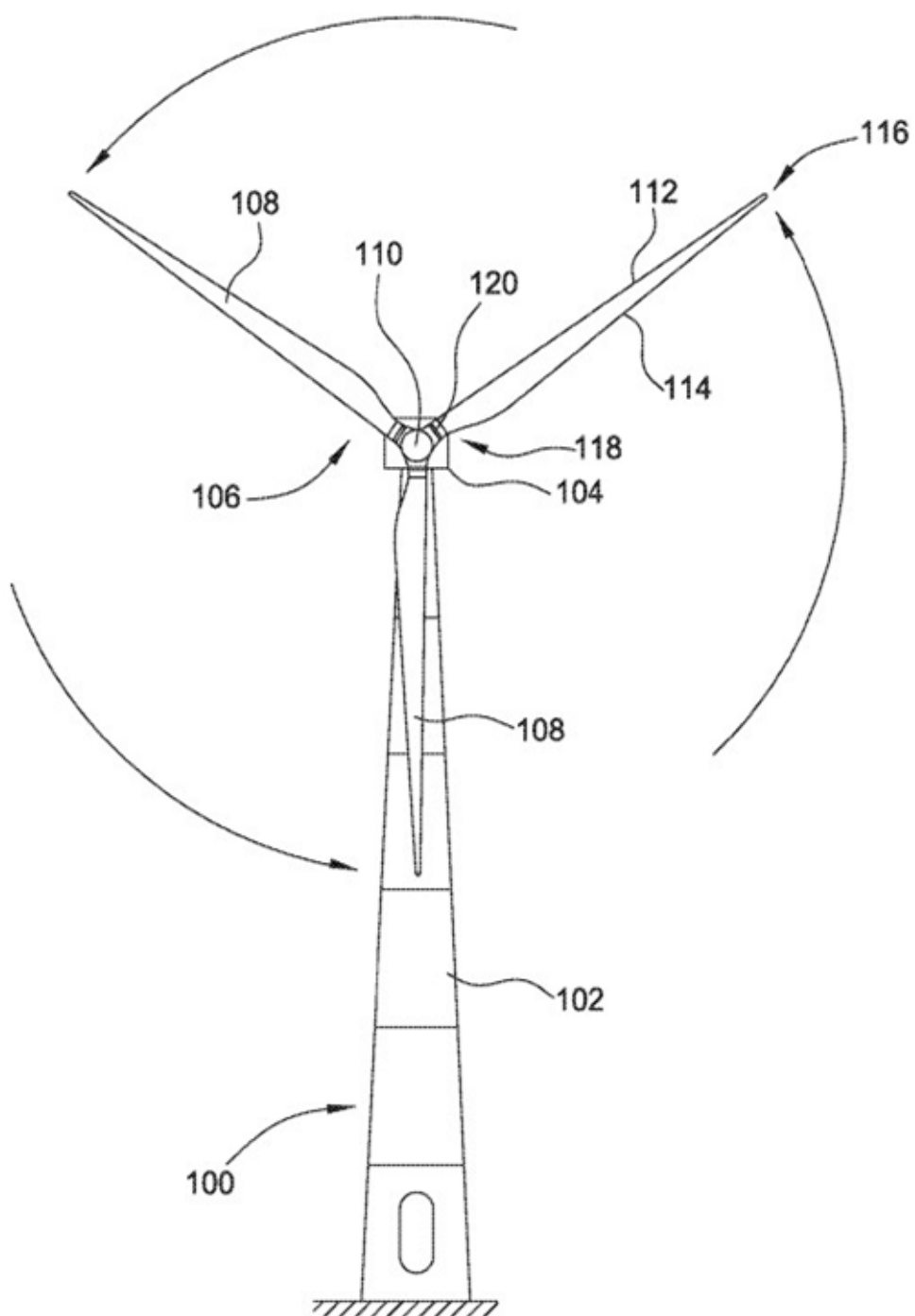


FIG. 1

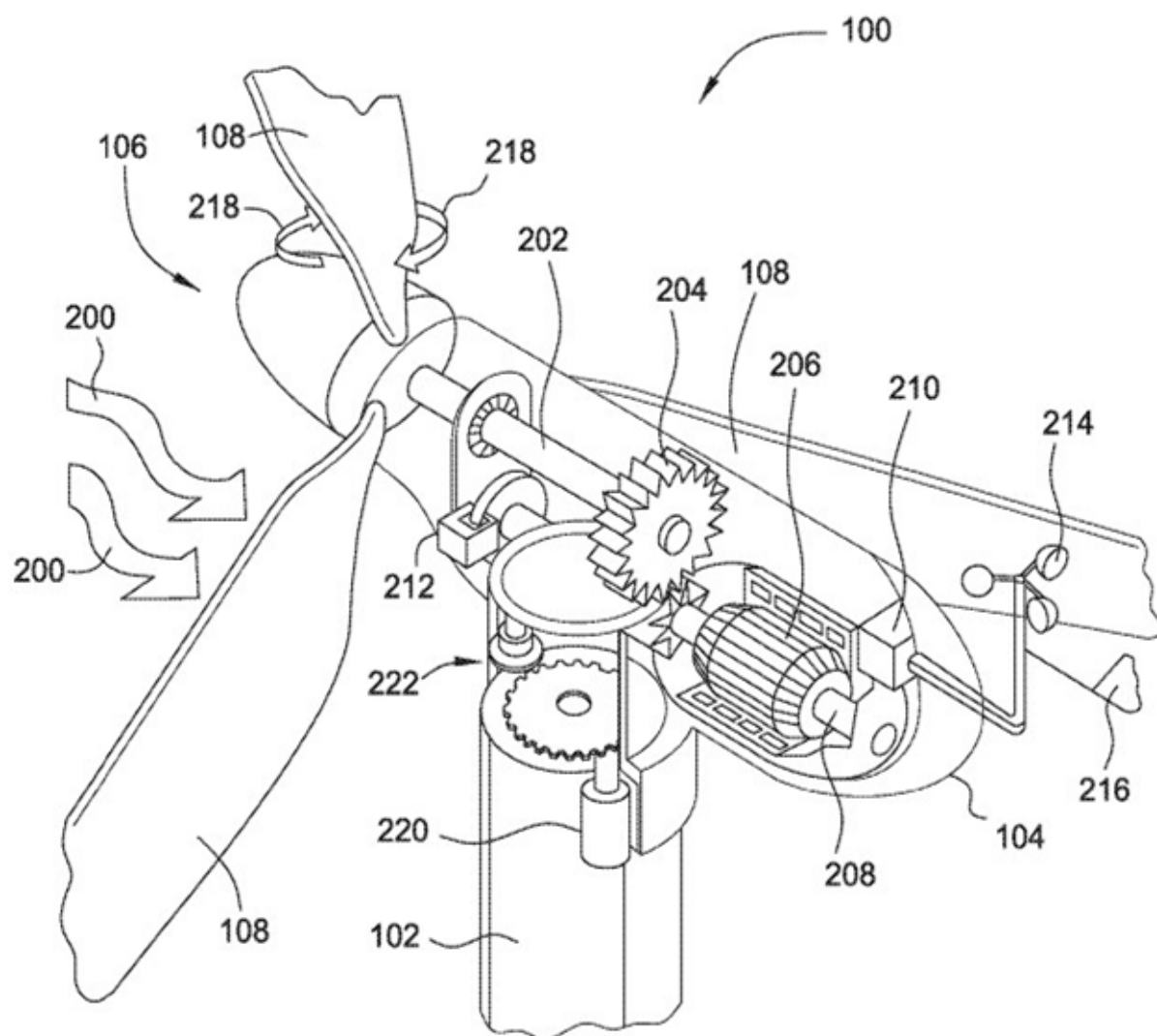


FIG. 2

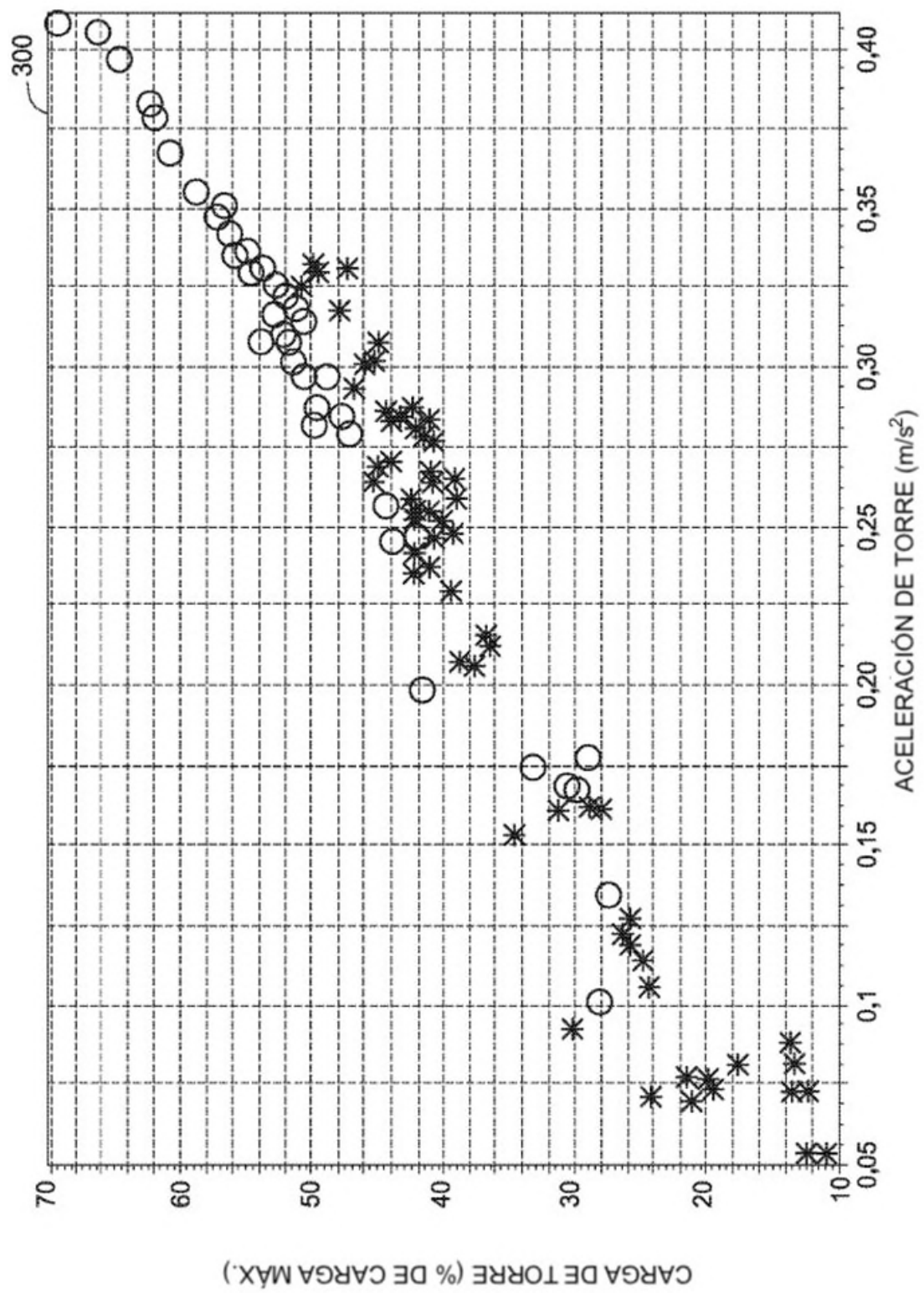
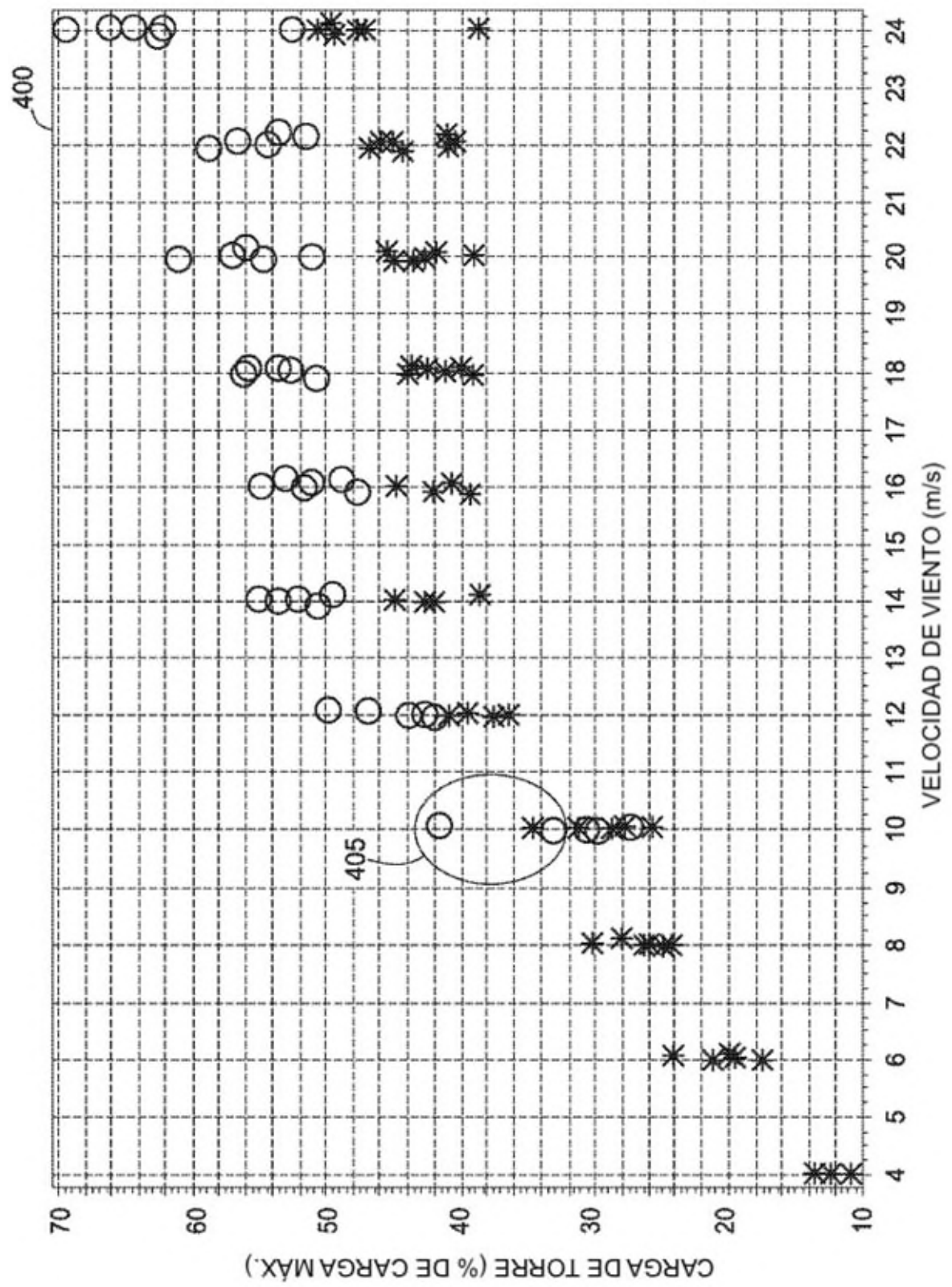


FIG. 3



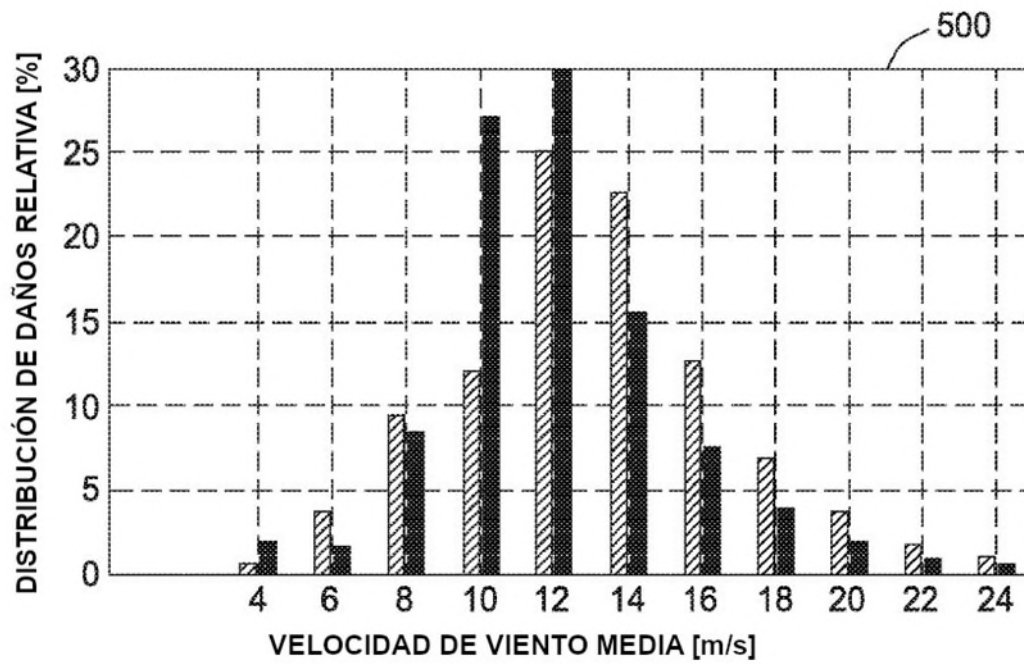


FIG. 5

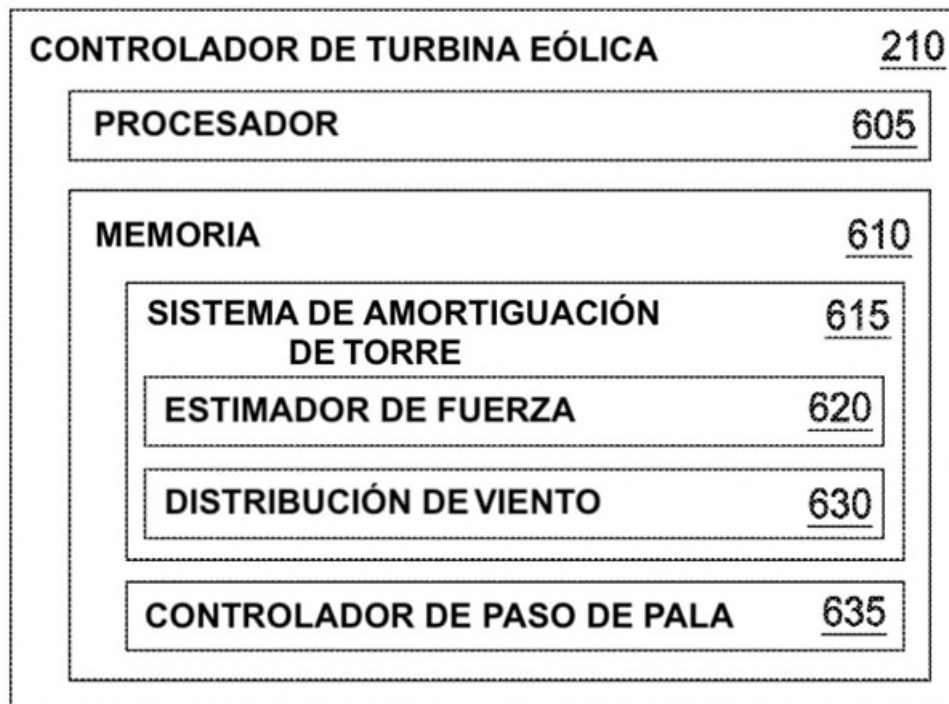


FIG. 6

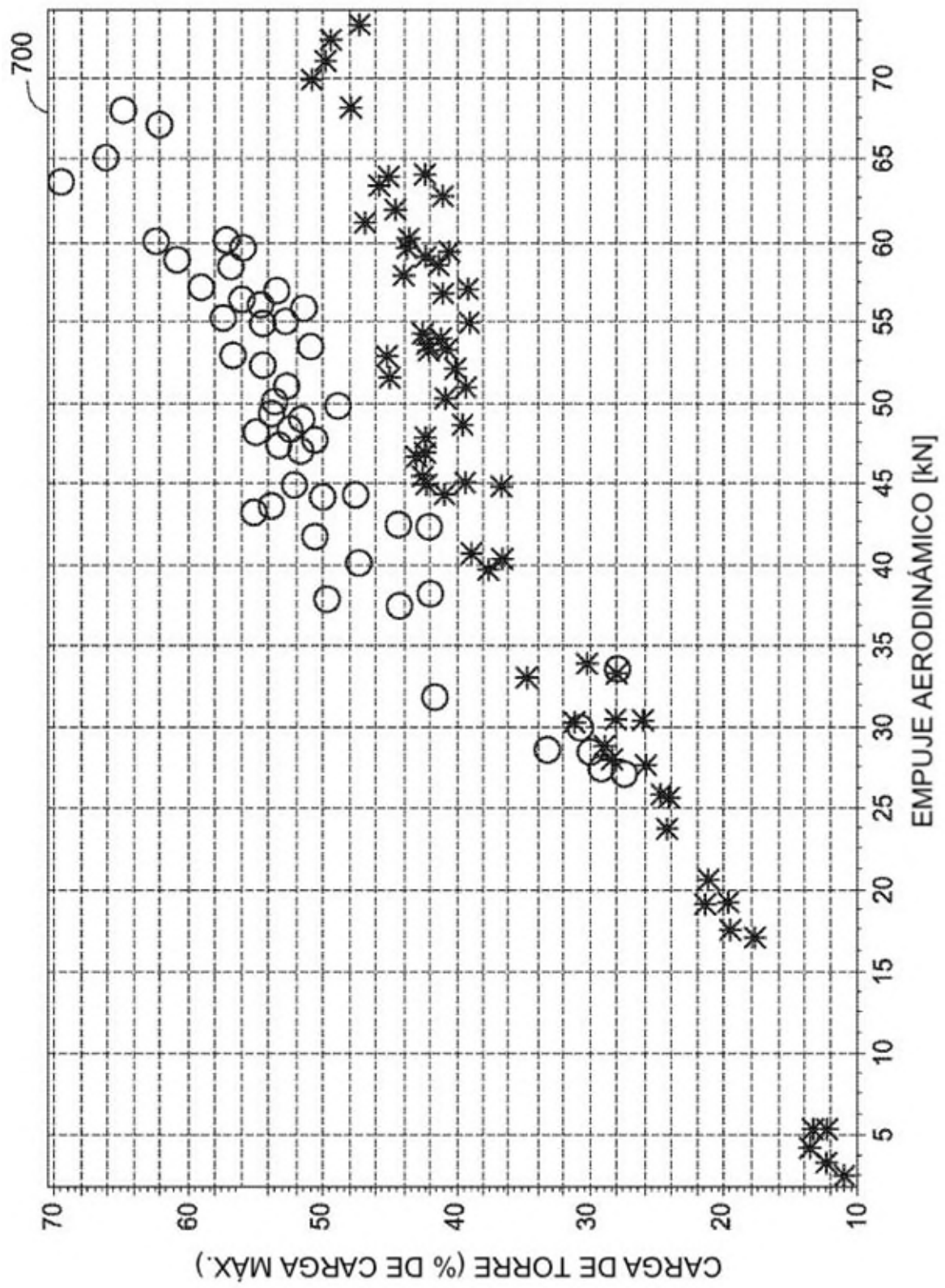


FIG. 7

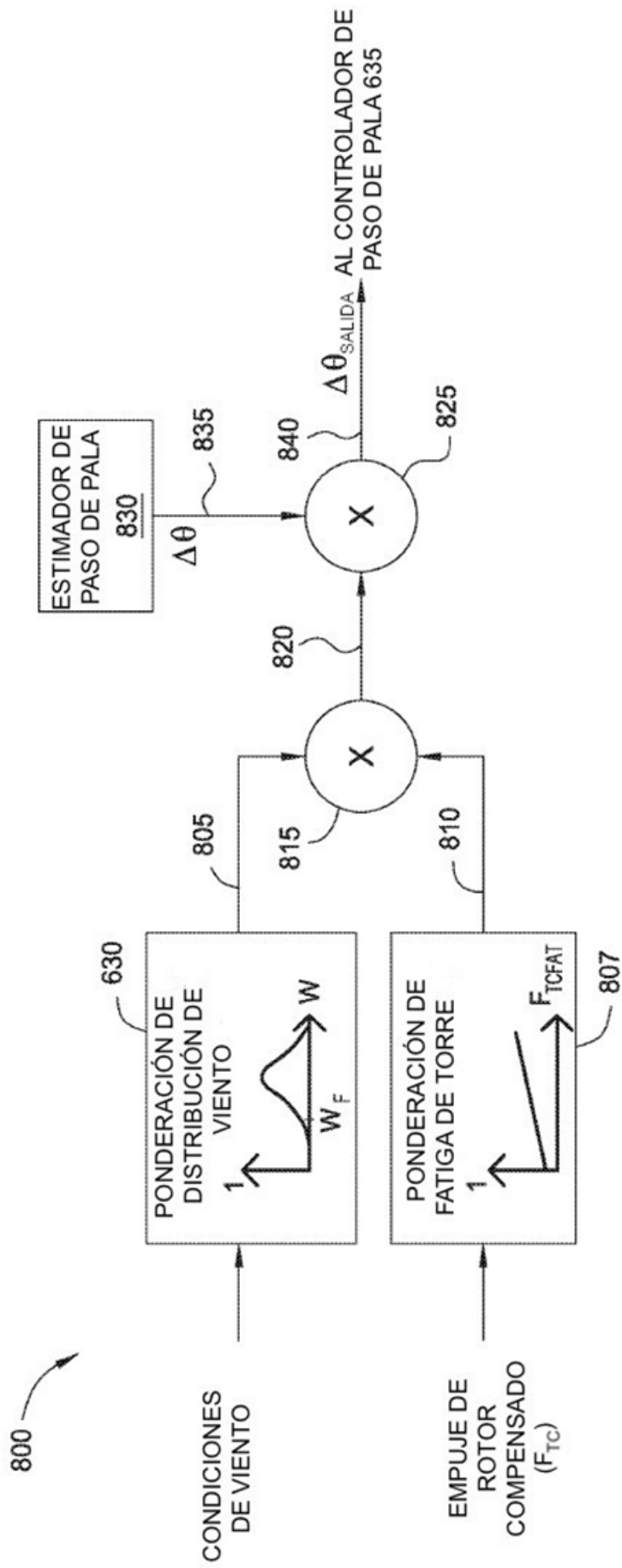


FIG. 8