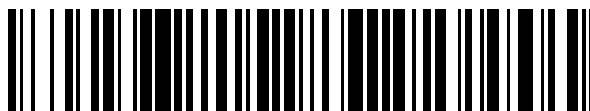


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 823 035**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.05.2018** **PCT/DK2018/050104**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.11.2018** **WO18210390**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.05.2018** **E 18726041 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.09.2020** **EP 3625450**

54 Título: **Reducción de vibración basada en posición del movimiento de góndola de una turbina eólica**

30 Prioridad:

19.05.2017 DK PA201770358

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:

CAPONETTI, FABIO;
THOMSEN, JESPER SANDBERG y
CHRISTENSEN, POUL BRANDT

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 823 035 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

Reducción de vibración basada en posición del movimiento de góndola de una turbina eólica

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere al control de una turbina eólica para reducir la vibración de góndola.

Antecedentes de la invención

10 Las turbinas eólicas, como se conoce en la técnica, comprenden una torre de turbina eólica que soporta una góndola y un rotor con una serie de palas de rotor de paso ajustable.

15 Una turbina eólica es propensa a las vibraciones, ya que comprende una gran masa colocada en el extremo de una torre esbelta. Estas vibraciones incluyen un movimiento de góndola en la dirección lateral, en la dirección longitudinal, así como en la dirección torsional de la góndola. Se sabe en la técnica que las vibraciones pueden amortiguarse inclinando activamente las palas y/o ajustando el par de generador para generar fuerzas contrarias para reducir el movimiento de góndola.

20 En este sentido, un ajuste colectivo del paso de pala, donde todas las palas de rotor se ajustan con el mismo ángulo de paso, puede usarse para contrarrestar las oscilaciones en la dirección longitudinal. Esto se logra modificando la fuerza de empuje. Para las vibraciones laterales, puede usarse un ajuste de paso de pala individual así como unos ajustes de par de generador para contrarrestar una vibración lateral de la torre. El ajuste de paso de pala individual proporciona unos parámetros de ángulo de paso individual para cada pala de rotor para generar una fuerza lateral resultante y/o para suprimir una perturbación existente de, por ejemplo, una desalineación de paso. El ajuste de par de generador genera una fuerza lateral inducida por el par de generador.

30 En el documento US2010289266 se describe una turbina eólica que está dispuesta para ajustar el ángulo de paso de pala de rotor para cada pala de rotor independientemente de la vibración lateral de la torre, de tal manera que se amortigua la amplitud de la vibración lateral de la torre. El ajuste de paso se basa en una aceleración medida de la góndola y una unidad de evaluación dispuesta para determinar una amplitud de paso basada en la aceleración de torre. Otros ejemplos que se relacionan con la reducción de las oscilaciones de torre en las turbinas eólicas se conocen por los documentos EP2963283 y W02010/060772.

35 Estos son los antecedentes a partir de los que se ha concebido la invención.

Sumario de la invención

40 sería ventajoso lograr medios mejorados para reducir la vibración de una góndola. En este sentido, sería ventajoso proporcionar medios mejorados para reducir la vibración del movimiento de góndola en la dirección lateral y/o en la dirección torsional.

45 En el control de las turbinas eólicas para reducir las vibraciones de la góndola, la ley de control puede basarse en una emulación del sistema de turbina eólica como un amortiguador viscoso (sistema de masa de resorte) donde el desplazamiento de la góndola en forma de un objeto con una masa dada se rige por una ecuación de movimiento diferencial de segundo orden, que incluye un coeficiente de amortiguación y un coeficiente de rigidez (constante de resorte). Para tal sistema, el control es diferente a través de la velocidad como señal de entrada y la posición como señal de entrada, ya que estos dos parámetros funcionan a través de diferentes términos en la ecuación de movimiento, es decir, a través del término amortiguación o el término rigidez.

50 Los inventores de la presente invención se han dado cuenta de que los parámetros que regulan el movimiento de la masa pueden verse influenciados para proporcionar una operación mejorada en relación con la reducción de vibración.

55 En un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método de control de una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica una estructura de torre que soporta una góndola y un rotor con una serie de palas de rotor de paso ajustable, estando el rotor dispuesto para accionar un generador eléctrico, comprendiendo el método:

60 obtener una señal de posición indicativa de una posición de la góndola en una dirección de un movimiento de la góndola;
determinar una primera señal basada en la señal de posición, determinándose la primera señal para reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola;
determinar una frecuencia de vibración de torre de un modo propio de vibración de torre; determinar una frecuencia de excitación que afecta a la estructura de torre; determinar una ganancia de ajuste, teniendo la ganancia de ajuste un signo operativo
65 definido por una separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre, y aplicar la ganancia de ajuste a la primera señal; y

determinar una señal de accionador basada en la primera señal con ganancia ajustada, y aplicar la señal de accionador a un accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola.

- 5 Al basar la señal de accionador del accionador capaz de reducir la vibración de góndola en la posición de la góndola, se ve influenciada la rigidez efectiva de la torre de turbina eólica, y puede obtenerse una estabilización del movimiento de góndola. La vibración no deseada del movimiento de góndola puede reducirse de este modo con una simple, pero robusta, estrategia de control. Al aplicar el ajuste de ganancia a la señal indicativa de una posición de la góndola, de manera que el signo operativo de la ganancia de ajuste se defina por la separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre, la frecuencia de torre puede alejarse eficazmente de la frecuencia de vibración de torre de un modo propio de vibración de torre. Esto aumentará la distancia entre la frecuencia de excitación y la frecuencia propia de la vibración de torre, lo que tiene un efecto beneficioso sobre el movimiento de vibración de torre.
- 10 La ganancia de ajuste se aplica a la primera señal. La ganancia de ajuste puede basarse en una función de ganancia de ajuste donde el valor absoluto es simétrico alrededor de la frecuencia de vibración de torre y con diferentes signos operativos en cada lado de la frecuencia de vibración de torre. Por lo tanto, la función de ganancia de ajuste en un lado de la frecuencia de vibración de torre es igual a la función de ganancia de ajuste en el otro lado de la frecuencia de vibración de torre, a excepción del signo operativo. Aunque el valor absoluto de la función de ganancia de ajuste puede ser simétrico alrededor de la frecuencia de vibración de torre, no necesita estar en todas las realizaciones.
- 15 En realizaciones donde la ganancia de ajuste sea una función de ganancia de ajuste, la función de ganancia de ajuste puede comprender una zona de ajuste alrededor de la vibración de torre que define una función de ganancia de ajuste en función de la separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre, y cero o insignificante fuera de la zona de ajuste. La zona de ajuste puede comprender una zona positiva donde la función de ganancia de ajuste es positiva en un lado de la frecuencia de vibración de torre, y una zona negativa donde la función de ganancia de ajuste es negativa en el otro lado de la frecuencia de vibración de torre. En el valor de la frecuencia de vibración de torre, la función de ganancia de ajuste puede tomar o el valor positivo o el valor negativo de la función de ganancia de ajuste.
- 20 La función de ganancia de ajuste puede ser una función continua dentro de la zona de ajuste, excepto en la frecuencia de vibración de torre donde puede saltar del valor positivo al valor negativo (o viceversa).
- 25 El valor absoluto de la función de ganancia de ajuste puede ser una función creciente que comienza con un valor pequeño para una separación grande entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre y un valor grande para una separación pequeña entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre, con un valor absoluto máximo en la frecuencia de vibración de torre.
- 30 La función de ganancia de ajuste puede definirse de acuerdo con cualquier función con una dependencia funcional de la velocidad de rotor que exprese que el signo operativo de la ganancia de ajuste está determinado por una separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre.
- 35 En una realización, la frecuencia de excitación es la frecuencia de rotor, y, en general, la frecuencia de excitación es un número entero positivo seleccionado, n , veces la frecuencia de rotor. Por lo tanto, la frecuencia de excitación puede ser una denominada $1P$, $2P$, $3P$, etc.
- 40 Una ventaja de las realizaciones de la presente invención es que se hace posible reducir las vibraciones para sistemas donde la frecuencia de excitación está cerca de un modo de frecuencia propia, independientemente de si la frecuencia de excitación es menor que la frecuencia propia o mayor que la frecuencia propia.
- 45 La dirección del movimiento de la góndola es, ventajosamente, la dirección lateral o la dirección torsional del movimiento de góndola. En este sentido, el modo propio de vibración de torre es el modo propio pertinente para la vibración. El modo propio puede ser un modo propio para la vibración lateral o un modo propio para la vibración torsional. En este sentido, el modo propio seleccionado para determinar la ganancia de ajuste puede ser el modo propio que comprende la mayor energía vibratoria, habitualmente el primer modo propio de la vibración pertinente, sin embargo, también pueden ser otros modos propios. En particular, puede ser un modo propio que se selecciona en función de la separación con la frecuencia de excitación, tal como el modo propio más cercano en frecuencia a la frecuencia de excitación.
- 50 En las realizaciones, la separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre puede basarse en una diferencia entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre o en una relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre. En este sentido, la separación es, preferentemente, una separación en frecuencia, y la separación puede basarse en la separación entre la frecuencia de excitación y el modo propio vibratorio que se selecciona para la amortiguación.
- 55 En una realización, también puede obtenerse una señal de velocidad indicativa de una velocidad de un movimiento de la góndola en la dirección del movimiento de la góndola, y, basándose en la señal de velocidad, puede determinarse
- 60
- 65

una segunda señal para reducir la vibración de góndola. La ganancia de ajuste se aplica a la segunda señal y, a continuación, la segunda señal con ganancia ajustada se aplica al accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección lateral del movimiento de la góndola.

- 5 Al aplicar una señal de velocidad además de la señal de posición con el fin de reducir la vibración, tanto el término de amortiguación como el término de rigidez del sistema de amortiguador viscoso emulado pueden ser objetivo, lo que puede dar como resultado un mejor control de reducción de vibraciones.

- 10 En las realizaciones, el accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola puede ser las palas de rotor de paso ajustable o la referencia de potencia. En relación con las palas de rotor de paso ajustable, puede aplicarse una señal de paso resultante a las palas de rotor de paso ajustable individualmente, basándose cada pala individual en una señal combinada de la referencia de paso colectivo y la primera señal, o una señal combinada de la referencia de paso colectivo y la primera señal y la segunda señal.

- 15 En relación con el uso de la señal de referencia de potencia resultante para el generador eléctrico como un accionador para la reducción de vibración, una referencia de potencia resultante puede basarse en una señal combinada de la referencia de potencia y la primera señal, o una señal combinada de la referencia de potencia y la primera señal y la segunda señal.

- 20 Tanto la referencia de paso colectivo para las palas de rotor de paso ajustable como la referencia de potencia para el generador eléctrico pueden determinarse en función de la velocidad de rotor. En una configuración ventajosa, la referencia de paso colectivo o la referencia de potencia se determinan mediante un control de retroalimentación basado en minimizar un error de velocidad entre una velocidad de rotor real y una velocidad de rotor de referencia. Una ventaja de esta realización es que se integra bien con la estrategia de control común de minimización de errores, por ejemplo, en relación con PID, PI o esquemas de control similares.

- 30 La posición de la góndola (y, opcionalmente, la velocidad) se determina, en general, a partir de una señal de posición indicativa de la posición de góndola y, por lo tanto, puede obtenerse mediante mediciones que no son directamente de la posición de góndola como tal. La posición de góndola puede determinarse mediante, o a partir de, una medición de la posición superior de torre, una medición de posición de buje de rotor u otras mediciones adecuadas. En una realización, la determinación se basa en una señal de aceleración medida indicativa del movimiento de góndola, por ejemplo, obtenida de un acelerómetro colocado en la góndola o en la parte superior de la torre. En general, la señal de posición (y, opcionalmente, la velocidad) puede obtenerse por otros medios adecuados dispuestos para emitir una señal indicativa de la posición de góndola (y la velocidad), incluyendo, pero sin limitarse a: una señal GPS, un inclinómetro, una unidad de medida inercial (IMU), un filtro de Kalman.

- 40 En una realización donde la señal de posición se basa en un acelerómetro colocado para medir una señal de aceleración de la góndola en la dirección del movimiento de la góndola, la señal de posición puede obtenerse aplicando en serie una primera integración de la señal de aceleración para obtener una señal de velocidad estimada y una segunda integración de la señal de velocidad para obtener la señal de posición. La señal de velocidad estimada puede usarse ventajosamente como la señal de velocidad indicativa de una velocidad de un movimiento de la parte superior de la torre como la señal de velocidad estimada.

- 45 Los acelerómetros se colocan a menudo en la góndola y/o la parte superior de la torre de las turbinas eólicas, y mediante el uso de esta señal, puede obtenerse una reducción de vibración usando equipos que ya están en su lugar o que pueden proporcionarse fácilmente. En esta configuración, la primera señal y/o la segunda señal pueden determinarse ventajosamente como la posición estimada multiplicada por una primera ganancia y/o como la velocidad estimada multiplicada por una segunda ganancia. Las ganancias pueden determinarse en función de métodos estándar para ajustar los bucles de control. En una realización que se implementa para basar el accionamiento solo en la señal de posición, esto puede obtenerse estableciendo la segunda ganancia en cero.

- 50 Ventajosamente, la señal de posición estimada se filtra en paso alto antes de determinar la primera señal. Al filtrar en paso alto la posición estimada, puede garantizarse que solo se amortigüen las vibraciones alrededor del punto operativo específico. Al basar la reducción de vibración en una retroalimentación de posición, el controlador forzará la posición hasta una posición de referencia. Al aplicar un filtro de paso alto a la señal de posición, la vibración se reduce con respecto al punto operativo actual de la góndola sin la necesidad de definir una posición de referencia.

- 60 En una realización, la ganancia de ajuste se determina además en función de una dependencia funcional de la velocidad de rotor. La dependencia funcional puede expresarse de cualquier manera que garantice que la ganancia es positiva para las frecuencias de rotor que son más bajas que el modo propio vibratorio, y negativa para las frecuencias de rotor que son más altas que el modo propio vibratorio.

- 65 La ganancia de ajuste puede ser además una ganancia programada por un término de programación de ganancia que depende de un punto operativo de la turbina eólica. Es decir, la ganancia total puede ajustarse para parámetros operativos tales como la velocidad del viento, la amplitud de aceleración, la velocidad de rotor u otros parámetros que definen un punto operativo.

En una realización, el accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección lateral del movimiento de la góndola es uno o ambos de:

- 5 un ajuste de la referencia de potencia dispuesto para variar un contrapar del generador a lo largo del tiempo en función de la vibración lateral para proporcionar una fuerza inducida por el par del generador que reduce la vibración lateral, y
- un ajuste del ángulo de paso de pala para cada pala de paso ajustable para proporcionar una fuerza lateral que contrarreste la vibración lateral.

10 El accionador capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección torsional del movimiento de la góndola es un ajuste del ángulo de paso de pala para cada pala de paso ajustable para proporcionar una fuerza torsional que contrarreste la vibración torsional.

- 15 En una realización donde el accionamiento de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola es un ajuste del ángulo de paso de pala para cada pala de paso ajustable, la señal de accionador puede transformarse de una señal que representa una fuerza o par deseado en la dirección del movimiento de la góndola a una contribución de paso resultante para cada una de las palas de rotor de paso ajustable. La señal no tiene por qué ser una señal de fuerza o par, pero debe representar o reflejar de otro modo la amplitud de una señal adecuada para reducir la vibración
- 20 de la góndola. La transformación consiste en obtener las contribuciones de paso resultantes para cada una de las palas de rotor de paso ajustable. La transformación puede basarse en una transformación de coordenadas de múltiples palas del tipo transformación de Coleman o transformación de coordenadas de Fourier, que está dispuesta para tomar una señal en un marco de referencia no rotatorio y transformarla en una señal resultante en el marco rotatorio. Por lo tanto, la transformación está dispuesta para transformar la señal de accionador que representa una fuerza o par deseado en la dirección del movimiento de la góndola en un marco de referencia no rotatorio en una contribución de
- 25 paso resultante para cada una de las palas de rotor de paso ajustable en el marco rotatorio.

En otros aspectos, se proporciona un producto de programa informático que comprende un código de software adaptado para controlar una turbina eólica de acuerdo con el primer aspecto cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos.

Otros aspectos también incluyen un sistema de control para una turbina eólica con un equipo de hardware adecuado, incluyendo módulos de entrada y salida para gestionar señales de control y módulos de procesamiento para implementar el método del primer aspecto. Además, se proporciona una turbina eólica que comprende el sistema de control.

El producto de programa informático puede proporcionarse en un medio de almacenamiento legible por ordenador o puede descargarse de una red de comunicación. El producto de programa informático comprende instrucciones para hacer que un sistema de procesamiento de datos, por ejemplo, en forma de controlador, lleve a cabo la instrucción cuando se carga en el sistema de procesamiento de datos.

En general, un controlador puede ser una unidad o colección de unidades funcionales que comprende uno o más procesadores, una o unas interfaces de entrada/salida y una memoria capaz de almacenar instrucciones que pueden ejecutarse por un procesador.

En general, los diversos aspectos de la invención pueden combinarse y acoplarse de cualquier manera posible dentro del alcance de la invención. Estos y otros aspectos, características y/o ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de, y se aclararán con referencia a, las realizaciones descritas en lo sucesivo en el presente documento.

50 Breve descripción de los dibujos

Se describirán realizaciones de la invención, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos, en los que

- la figura 1 ilustra una turbina eólica (figura 1A) junto con una vista esquemática del movimiento vibratorio lateral (figura 1B) y un movimiento vibratorio torsional (figura 1C);
- la figura 2 ilustra un esquema de control general para una realización;
- la figura 3 ilustra una realización general de un bloque de reducción de vibración de torre lateral;
- la figura 4 ilustra un ejemplo de la ganancia de ajuste en función de la frecuencia de rotor; y
- la figura 5 y la figura 6 ilustran representaciones gráficas a modo de ejemplo.

Descripción de las realizaciones

La figura 1A ilustra, en una vista en perspectiva esquemática, un ejemplo de una turbina eólica 1. La turbina eólica 1 incluye una torre 2, una góndola 3 dispuesta en el vértice de la torre, y un rotor 4 acoplado operativamente a un generador alojado dentro de la góndola 3. Además del generador, la góndola aloja diversos componentes requeridos para convertir la energía eólica en energía eléctrica y diversos componentes necesarios para operar, controlar y

optimizar el rendimiento de la turbina eólica 1. El rotor 4 de la turbina eólica incluye un buje central 5 y una pluralidad de palas 6 que sobresalen hacia el exterior desde el buje central 5. En la realización ilustrada, el rotor 4 incluye tres palas 6, pero el número puede variar. Además, la turbina eólica comprende un sistema de control. El sistema de control puede colocarse dentro de la góndola o distribuirse en una serie de localizaciones dentro (o fuera) de la turbina y conectarse comunicativamente. Las palas de rotor son de paso ajustable. Las palas de rotor pueden ajustarse de acuerdo con una configuración de paso colectivo, donde cada una de las palas se establece con el mismo valor de paso. Además, las palas de rotor pueden ajustarse de acuerdo con unos parámetros de paso individual, donde cada pala puede estar provista de un parámetro de paso individual.

La turbina puede vibrar en la dirección lateral 7A, que es en una dirección del plano de rotor. Dicha vibración también se denomina a veces vibración lateral. Los aspectos de la vibración lateral se ilustran esquemáticamente en la figura 1B. En esta figura, la turbina 10 se ilustra esquemáticamente mediante una estructura de torre fijada en un extremo y provista de una masa en el extremo libre. Cuando la parte superior de la torre vibra en la dirección lateral 7A, la posición, x , característica de la posición de góndola, varía entre dos máximos definidos por la desviación de torre máxima durante la vibración. La posición, x , puede ser una posición representativa de la posición de góndola en una dirección definida por el movimiento lateral. La posición puede, por ejemplo, ser una posición de centro de masa de la góndola, la posición del sensor pertinente, o la posición de otros puntos fijos que representan el movimiento de la góndola en la dirección lateral. Además de la vibración lateral, en la figura 1C también se ilustra la vibración torsional a lo largo de la dirección torsional 7B. A este respecto, la dirección torsional debe entenderse como el movimiento a lo largo de una trayectoria definida por un sector de arco o sector de círculo, como se muestra. Cuando la parte superior de la torre vibra en la dirección torsional 7B, la posición, x' , característica de la posición de góndola en la dirección torsional, varía entre dos máximos definidos por la torsión de torre máxima durante la vibración. En una realización que usa un acelerómetro 8 o giroscopio 8 para determinar el movimiento de góndola, el acelerómetro/giroscopio debe colocarse adecuadamente, tal como en un extremo de la góndola. En este sentido, puede no ser necesario detectar directamente el movimiento a lo largo de la dirección torsional, pudiendo usarse también en su lugar la detección indirecta del movimiento, siempre que el movimiento indirecto se correlacione con el movimiento torsional. Esto puede obtenerse, por ejemplo, mediante un acelerómetro que detecte movimiento en la dirección lateral, en combinación con información adicional para determinar que el movimiento está relacionado con la vibración torsional. Dicha información adicional puede ser la frecuencia de la vibración.

En una realización general de la presente invención, el movimiento vibratorio se reduce mediante las siguientes etapas generales: obtener una señal de posición indicativa de una posición de la góndola en el movimiento pertinente, es decir, determinar x (o x'). Basándose en la señal de posición que determina una señal para amortiguar el movimiento de góndola y, finalmente, aplicar la señal a un accionador capaz de reducir la vibración.

La figura 2 es un diagrama que ilustra esquemáticamente esta realización general en el contexto de un controlador de velocidad de retroalimentación. En una implementación, el controlador de velocidad minimiza un error de velocidad ($\omega - \omega_{ref}$) entre la velocidad de generador real, ω , y una velocidad de referencia, ω_{ref} , con el fin de generar una potencia requerida P y una referencia de paso colectivo, θ_{col} . El controlador de velocidad de retroalimentación puede implementarse mediante un PI, PID o esquemas de control similares.

La figura 2 ilustra además una serie de bloques de control de reducción de vibración.

Se ilustra un bloque que muestra la reducción de vibración de torre lateral usando el paso (paso LTVR), donde las señales de accionamiento de paso para reducir las vibraciones de torre laterales se determinan en función de la primera señal y, opcionalmente, la segunda señal. Las realizaciones de las señales primera y segunda se ilustran en la figura 3.

El bloque de control de paso LVRT determina una señal de accionador θ_P que se transforma en una unidad de transformación T_P para los desplazamientos de referencia de paso ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) para cada una de las palas, de manera que las señales de paso resultantes ($\theta_A, \theta_B, \theta_C$) puedan aplicarse a las palas de rotor de paso ajustable individualmente. Cada señal de accionamiento de pala individual se basa en la señal de accionador θ_P , por lo tanto, en una señal combinada de la referencia de paso colectivo θ_{col} y la primera señal, o una señal combinada de la referencia de paso colectivo y la primera señal y la segunda señal como se determina por el bloque de paso LTVR.

El bloque de paso LTVR determina una señal que representa una fuerza o par deseado en la dirección del movimiento de la góndola. La transformación es para obtener las contribuciones de paso resultantes ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) para cada una de las palas de rotor de paso ajustable.

La transformación, T_P , puede basarse en una transformación de coordenadas de múltiples palas del tipo transformación de Coleman o transformación de coordenadas de Fourier, que está dispuesta para tomar una señal en un marco de referencia no rotatorio (θ_P) y transformarlo en una señal resultante en el marco rotatorio ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$).

Además, o como alternativa, la vibración de torre lateral también puede reducirse usando la potencia como accionador (potencia LTVR), donde una señal de accionamiento de potencia para reducir las vibraciones de torre laterales mediante el uso de la referencia de potencia se determina en función de la primera señal y, opcionalmente, la segunda

señal.

El bloque de control de potencia LVRT determina un desplazamiento de referencia de potencia ($P_{\text{desplazamiento}}$) a combinar con la referencia de potencia P para proporcionar una referencia de potencia resultante ($P_{\text{establecida}}$). La referencia de potencia resultante se determina en función de una señal combinada de la referencia de potencia y la señal de accionador $P_{\text{desplazamiento}}$, y, por lo tanto de la primera señal, o una señal combinada de la referencia de potencia y la primera señal y la segunda señal. La señal de referencia de potencia resultante se aplica al generador eléctrico. Las realizaciones de las señales primera y segunda se ilustran en la figura 3.

Además, o como alternativa, la vibración de torre torsional también puede reducirse usando el paso como accionador (torsión LTVR), donde las señales de accionamiento de paso para reducir las vibraciones de torre torsionales se determinan en función de la primera señal y, opcionalmente, la segunda señal.

El bloque de control de torsión LVRT determina una señal de accionador θ_T que se transforma en una unidad de transformación T_P para desplazamientos de referencia de paso (θ_{T1} , θ_{T2} , θ_{T3}) para cada una de las palas, de manera que las señales de paso resultantes (θ_A , θ_B , θ_C) puedan aplicarse a las palas de rotor de paso ajustable individualmente. Cada señal de accionamiento de pala individual se basa en la señal de accionador θ_P , por lo tanto, en una señal combinada de la referencia de paso colectivo θ_{col} y la primera señal, o una señal combinada de la referencia de paso colectivo y la primera señal y la segunda señal, como se determina por el bloque de torsión LTVR. Las realizaciones de las señales primera y segunda se ilustran en la figura 3.

El bloque de torsión LTVR corresponde al bloque LTVR, y la transformación, T_T , es similar a la transformación T_P , esperando que la implementación específica permita el movimiento torsional.

Además, la reducción de vibración en la dirección longitudinal también puede ser objetivo imponiendo una señal de desplazamiento de paso de reducción de vibración sobre la referencia de paso colectivo θ_{col} . Esta señal de desplazamiento de paso puede determinarse en un bloque de reducción de vibración longitudinal (FAVR), para proporcionar una reducción de la vibración o una amortiguación del movimiento de góndola, en la dirección longitudinal.

La referencia de paso colectivo se determina por el controlador de velocidad en vista de la velocidad de rotor y posiblemente también de otros valores de sensor, a los que hace referencia en la figura 2 como un conjunto de mediciones, ms.

La figura 3 ilustra una realización general de un bloque de reducción de vibración de torre lateral. A este respecto, se entiende que los bloques de reducción de vibración de torre relacionados con la potencia, el paso y la torsión, como se ilustra en la figura 2, podrían implementarse de acuerdo con este esquema general. Sin embargo, la implementación específica diferiría para los diferentes tipos de accionamiento. En particular, los diversos filtros y ganancias se adaptarían al bloque de accionamiento o tipo de accionamiento específico.

La figura 3 ilustra una realización de los bloques LTVR de la figura 2, donde una señal de acelerómetro medida, a , se usa como entrada y se obtiene mediante un acelerómetro colocado de manera que se mida la aceleración del movimiento en la dirección pertinente de la góndola, véase la referencia 8 en la figura 1.

La señal de aceleración puede usarse, en general, como una señal sin procesar, sin embargo, habitualmente la señal se preprocesa PP hasta cierto punto. Tal preprocesamiento puede ser la aplicación de un filtro antisolapamiento para eliminar cualquier contenido de alta frecuencia que no sea necesario para el uso posterior. Otros filtros, incluyendo otro filtro de paso de banda, pueden aplicarse durante el preprocesamiento.

La señal de aceleración (o versión preprocesada de la misma) se procesa adicionalmente aplicando una serie de filtros a la señal. En la realización ilustrada, una señal de posición estimada, x (o x'), indicativa de una posición de la parte superior de la torre en la dirección pertinente, se obtiene aplicando en serie una primera integración (F1) de la señal de aceleración para obtener una señal de velocidad estimada, v (o v'), y una segunda integración (F2) de la señal de velocidad para obtener la señal de posición, x (o x'). En general, puede aplicarse cualquier filtro adecuado que integre la señal de entrada. En una realización, las integraciones primera y segunda pueden implementarse como integradores con fugas. Los integradores con fugas pueden implementarse como filtros de paso bajo de primer orden sintonizados con una frecuencia de corte por debajo de la primera frecuencia de modo longitudinal, siendo la frecuencia la frecuencia de sistema que comprende la torre, el rotor, la góndola y, opcionalmente, también la cimentación.

La primera señal para el accionador capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección pertinente (paso o potencia) puede determinarse como la posición estimada, x , multiplicada por una primera ganancia $G1$.

En una realización, la señal de velocidad indicativa de una velocidad de un movimiento de la parte superior de la torre en la dirección pertinente puede obtenerse como la señal de velocidad estimada v , que resulta después de la primera integración F1.

La segunda señal puede determinarse como la velocidad estimada, v , multiplicada por una segunda ganancia $G2$.

En esta realización, la señal resultante es la suma de las señales primera (posición) y segunda (velocidad). Tal y como se ha descrito, la invención puede implementarse en una realización basándose solo en la primera señal. En una realización de este tipo, esto puede obtenerse estableciendo la ganancia G2 en cero.

En una realización adicional, tal y como se ilustra también en la figura 3, la señal de posición se filtra en paso alto (HP) antes de determinar la primera señal.

Una ventaja general de la realización descrita en relación con las figuras 2 y 3 es que las mediciones o estimaciones de posición y velocidad no tienen que tener valores absolutos correctos, siempre y cuando las señales se correlacionen con los valores reales en el área de frecuencia de interés.

La figura 4 ilustra un ejemplo de la ganancia de ajuste en función de la frecuencia de rotor. Es decir, para una situación donde la frecuencia de excitación es la frecuencia de rotor. Por lo tanto, para una situación donde la excitación se impone por el rotor rotatorio.

La ganancia de ajuste se aplica a la primera señal y, opcionalmente, a la segunda señal, con el fin de obtener una ganancia de ajuste con respecto a la primera señal y, opcionalmente, la segunda señal, antes de aplicar las señales al accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola.

En este sentido, se determina la frecuencia de vibración de torre de un modo propio de vibración de torre y se determina la frecuencia de rotor correspondiente a la velocidad de rotor. Basándose en estos valores, se determina la ganancia de ajuste de manera que el signo operativo de la misma se defina por una separación entre la frecuencia de rotor y la frecuencia de vibración de torre.

En este sentido, la señal de accionamiento S_{acc} puede expresarse como:

$$S_{acc} = g_{aj}(g_1 \cdot x_{est} + g_2 \cdot v_{est})$$

En la realización ilustrada en la figura 4, la ganancia de ajuste se establece en 0 para las frecuencias de rotor fuera de una zona de ajuste y aumentando positivamente para las frecuencias de rotor que se aproximan al primer modo propio de frecuencias más bajas, y aumentando negativamente para las frecuencias de rotor que se aproximan al primer modo propio de frecuencias más altas.

En la figura 4, la función de ganancia de ajuste se ilustra como una función lineal por tramos, sin embargo, esta función puede definirse de acuerdo con cualquier función con una dependencia funcional de la velocidad de rotor que exprese que el signo operativo de la ganancia de ajuste está determinado por una separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre.

En las realizaciones, la separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre se basa en una diferencia entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre o en una relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre.

En una realización, puede programarse, además, la ganancia de la señal de accionamiento S_{acc} , incluyendo en la ganancia de ajuste un término de programación de ganancia que dependa de un punto operativo de la turbina eólica. Por ejemplo, el término de ajuste de ganancia puede multiplicarse por un factor que aumenta con el aumento de la aceleración en la dirección lateral.

La figura 5 ilustra representaciones gráficas a modo de ejemplo en forma de trazas de tiempo obtenidas por el método, tal como se define en la figura 3, en comparación con la misma situación sin la aplicación del método. Las representaciones gráficas se basan en una simulación de un sistema de turbina eólica.

La figura 5A ilustra unos parámetros de paso a modo de ejemplo para una situación de referencia 51 en comparación con los parámetros de paso 50 correspondientes para una situación donde las vibraciones laterales se reducen basándose en las realizaciones de la presente invención. La representación gráfica ilustra el ángulo de paso de pala en grados, correspondiendo la representación gráfica denominada 50, por ejemplo, a θ_1 .

La figura 5B ilustra la posición lateral superior de torre resultante para la situación de referencia 53 y la situación donde se aplica la reducción de vibración lateral 51. Como puede verse directamente, se ha reducido la amplitud de la vibración superior de torre.

Las simulaciones se realizan para una situación donde la frecuencia de rotor coincide con el primer modo propio de la vibración lateral. La figura 5C ilustra una transformada rápida de Fourier (FFT) de las dos señales de la figura 5B. Por lo tanto, la figura muestra las representaciones gráficas de FFT para la situación de referencia 54 y para la situación basada en las realizaciones de la presente invención 55.

Como puede verse, la frecuencia de torre se aleja de la frecuencia de vibración de torre, aumentando de este modo la distancia entre la frecuencia de rotor y la frecuencia propia.

5 La figura 6 ilustra representaciones gráficas a modo de ejemplo en forma de trazas de tiempo obtenidas por el método, tal como se define en la figura 3, en comparación con la misma situación sin la aplicación del método. Las representaciones gráficas se basan en una simulación de un sistema de turbina eólica.

10 La figura 6A ilustra unos parámetros de paso a modo de ejemplo para una situación de referencia 61 en comparación con los parámetros de paso 60 correspondientes para una situación donde las vibraciones torsionales se reducen basándose en las realizaciones de la presente invención. La representación gráfica ilustra el ángulo de paso de pala en grados, correspondiendo la representación gráfica denominada 60, por ejemplo, a θ_{T1} .

15 La figura 6B ilustra la velocidad de guiñada de góndola resultante, que es una medida de la vibración torsional para la situación de referencia 63 y la situación 62 donde se aplica la reducción de vibración torsional. Como puede verse directamente, se ha reducido la amplitud de la vibración superior de torre.

20 La figura 6C ilustra una transformada rápida de Fourier (FFT) de las dos señales de la figura 6B. Por lo tanto, la figura muestra las representaciones gráficas de FFT para la situación de referencia 64 y para la situación basada en las realizaciones de la presente invención 65.

Como puede verse, se ha reducido el pico en la frecuencia observada, lo que muestra que se ha logrado una reducción en la vibración torsional.

25 Aunque la presente invención se ha descrito en relación con las realizaciones específicas, no debería interpretarse de ninguna manera que limite los ejemplos presentados. La invención puede implementarse por cualquier medio adecuado; y el alcance de la presente invención ha de interpretarse a la luz del conjunto de reivindicaciones adjuntas. Ningún símbolo de referencia en las reivindicaciones debería interpretarse como limitante del alcance.

REIVINDICACIONES

1. Un método para controlar una turbina eólica, comprendiendo la turbina eólica una estructura de torre que soporta una góndola y un rotor con una serie de palas de rotor de paso ajustable, estando el rotor dispuesto para accionar un generador eléctrico, comprendiendo el método:
5 obtener una señal de posición indicativa de una posición de la góndola en una dirección de un movimiento de la góndola;
determinar una primera señal basada en la señal de posición, determinándose la primera señal para reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola;
10 determinar una frecuencia de vibración de torre de un modo propio de vibración de torre;
determinar una frecuencia de excitación que afecta a la estructura de torre;
determinar una ganancia de ajuste, teniendo la ganancia de ajuste un signo operativo definido por una separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre, y aplicar la ganancia de ajuste a la primera señal; y
15 determinar una señal de accionador basada en la primera señal con ganancia ajustada, y aplicar la señal de accionador a un accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola.
- 20 2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además:
obtener una señal de velocidad indicativa de una velocidad de un movimiento de la góndola en la dirección del movimiento de la góndola;
determinar una segunda señal basada en la señal de velocidad, determinándose la segunda señal para reducir la vibración de góndola, y aplicar la ganancia de ajuste a la segunda señal; y basándose además la señal de accionador en la segunda señal con ganancia ajustada.
- 25 3. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:
determinar una referencia de paso colectivo para las palas de rotor de paso ajustable, determinándose la referencia de paso colectivo en función de una velocidad de rotor,
30 aplicar una señal de paso resultante a las palas de rotor de paso ajustable, aplicándose la señal de paso resultante a las palas de rotor de paso ajustable individualmente y basándose, para cada pala individual, en una señal combinada de la referencia de paso colectivo y la señal de accionador.
- 35 4. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además transformar la señal de accionador de una señal que representa una fuerza o par deseado en la dirección del movimiento de la góndola a una contribución de paso resultante para cada una de las palas de rotor de paso ajustable.
- 40 5. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:
determinar una referencia de potencia para el generador eléctrico, determinándose la referencia de potencia en función de una velocidad de rotor,
45 aplicar una señal de referencia de potencia resultante al generador eléctrico, basándose la referencia de potencia resultante en una señal combinada de la referencia de potencia y la señal de accionador.
6. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la turbina eólica comprende un acelerómetro colocado para medir una señal de aceleración de la góndola, y comprendiendo el método:
50 obtener la señal de aceleración en la dirección del movimiento de la góndola;
obtener la señal de posición indicativa de una posición de la parte superior de la torre en la dirección como una señal de posición estimada aplicando en serie una primera integración de la señal de aceleración para obtener una señal de velocidad estimada y una segunda integración de la señal de velocidad para obtener la señal de posición.
- 55 7. El método de acuerdo con la reivindicación 6, comprendiendo el método además:
obtener la señal de velocidad indicativa de una velocidad de un movimiento de la parte superior de la torre como la señal de velocidad estimada.
- 60 8. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la señal de posición se filtra en paso alto antes de determinar la primera señal.
9. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la frecuencia de excitación es un número entero positivo seleccionado, n, veces la frecuencia de rotor.
- 65 10. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre se basa en una diferencia entre la frecuencia de excitación y la

frecuencia de vibración de torre o en una relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre.

5 11. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la ganancia de ajuste se determina además basándose en una dependencia funcional de la velocidad de rotor.

10 12. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la ganancia de ajuste comprende además un término de programación de ganancia, dependiendo el término de programación de ganancia de un punto operativo de la turbina eólica.

13. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección lateral del movimiento de la góndola es uno o ambos de:

15 un ajuste de la referencia de potencia dispuesto para variar un contrapar del generador a lo largo del tiempo en función de la vibración lateral para proporcionar una fuerza inducida por el par del generador que reduce la vibración lateral, y
un ajuste del ángulo de paso de pala para cada pala de paso ajustable para proporcionar una fuerza lateral que contrarreste la vibración lateral.

20 14. Un producto de programa informático que comprende un código de software adaptado para controlar una turbina eólica cuando se ejecuta en un sistema de procesamiento de datos, estando el producto de programa informático adaptado para realizar el método de cualquiera de las reivindicaciones 1-13.

25 15. Una turbina eólica que comprende una estructura de torre que soporta una góndola y un rotor con una serie de palas de rotor de paso ajustable, estando el rotor dispuesto para accionar un generador eléctrico, comprendiendo la estructura de turbina eólica además un sistema de control que comprende:

30 un módulo de entrada dispuesto para obtener una señal de posición indicativa de una posición de la góndola en una dirección de un movimiento de la góndola;
un módulo de procesamiento dispuesto para:

35 determinar una primera señal basada en la señal de posición, determinándose la primera señal para reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola;
determinar una frecuencia de vibración de torre de un modo propio de vibración de torre;
determinar una frecuencia de excitación que afecta a la estructura de torre; determinar una ganancia de ajuste, teniendo la ganancia de ajuste un signo operativo definido por una separación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia de vibración de torre, y aplicar la ganancia de ajuste a la primera señal, y
determinar una señal de accionador basada en la primera señal con ganancia ajustada; y

40 un sistema de accionador dispuesto para aplicar la señal de accionador a un accionador de la turbina eólica capaz de reducir la vibración de góndola en la dirección del movimiento de la góndola.

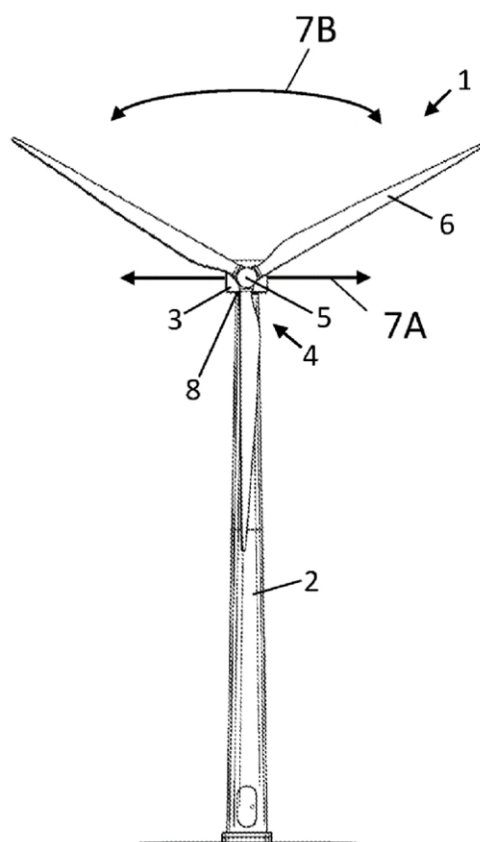


Fig. 1A

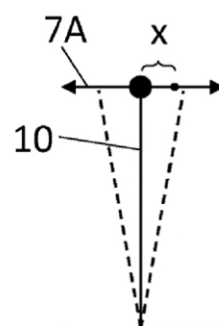


Fig. 1B

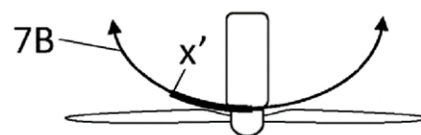


Fig. 1C

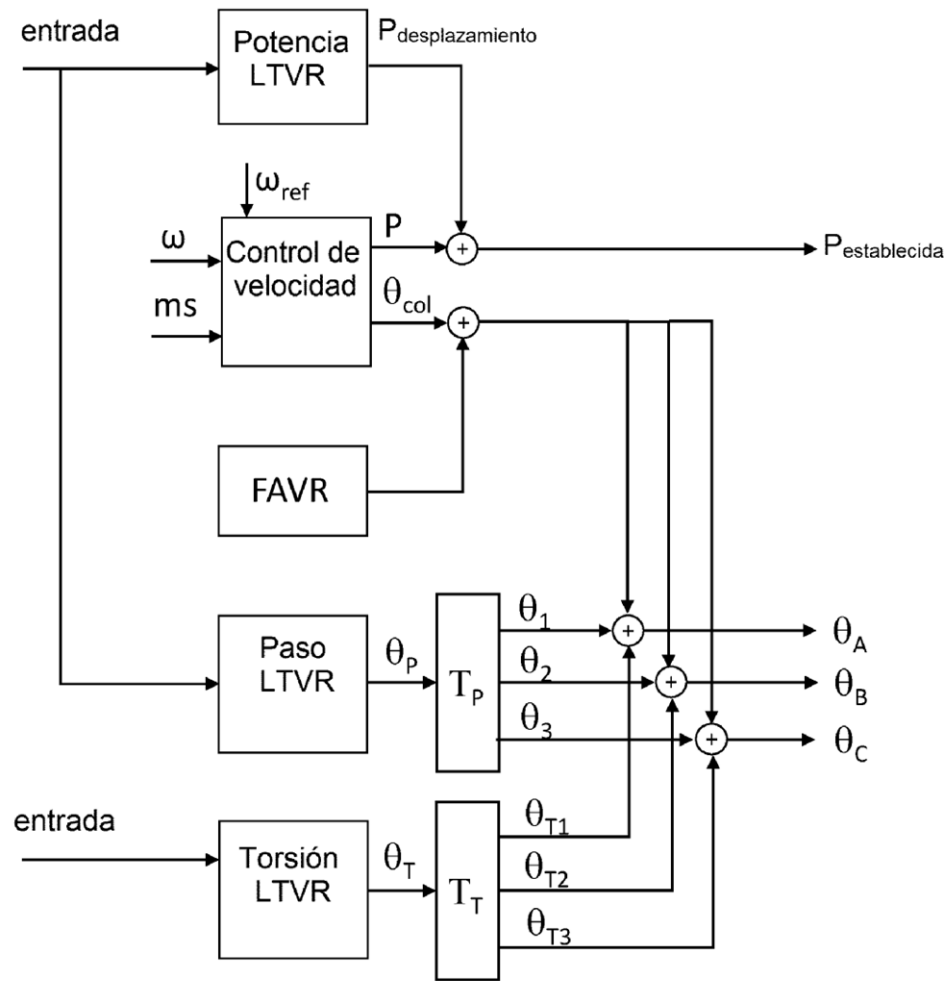


Fig. 2

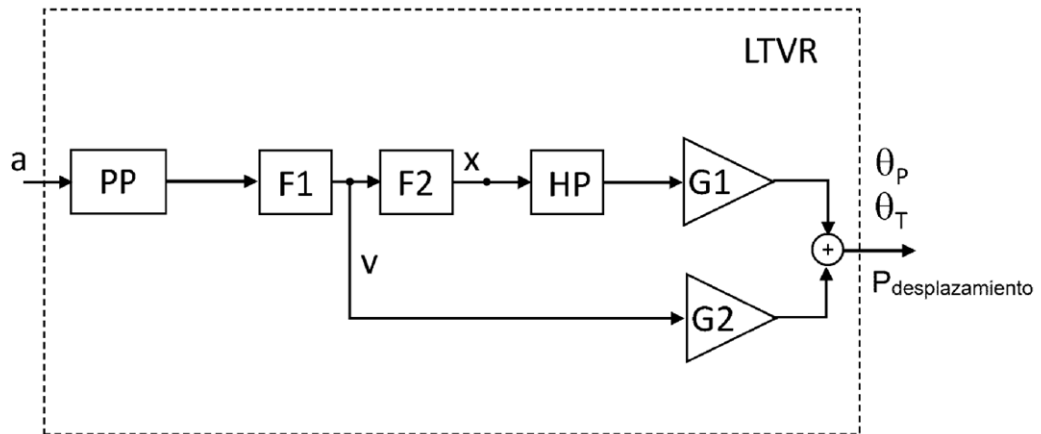


Fig. 3

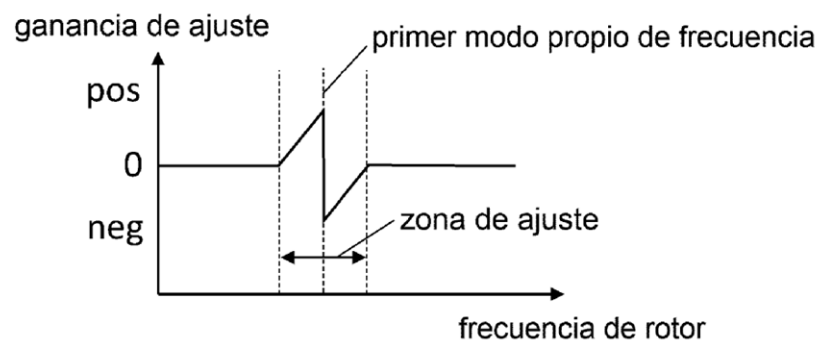


Fig. 4

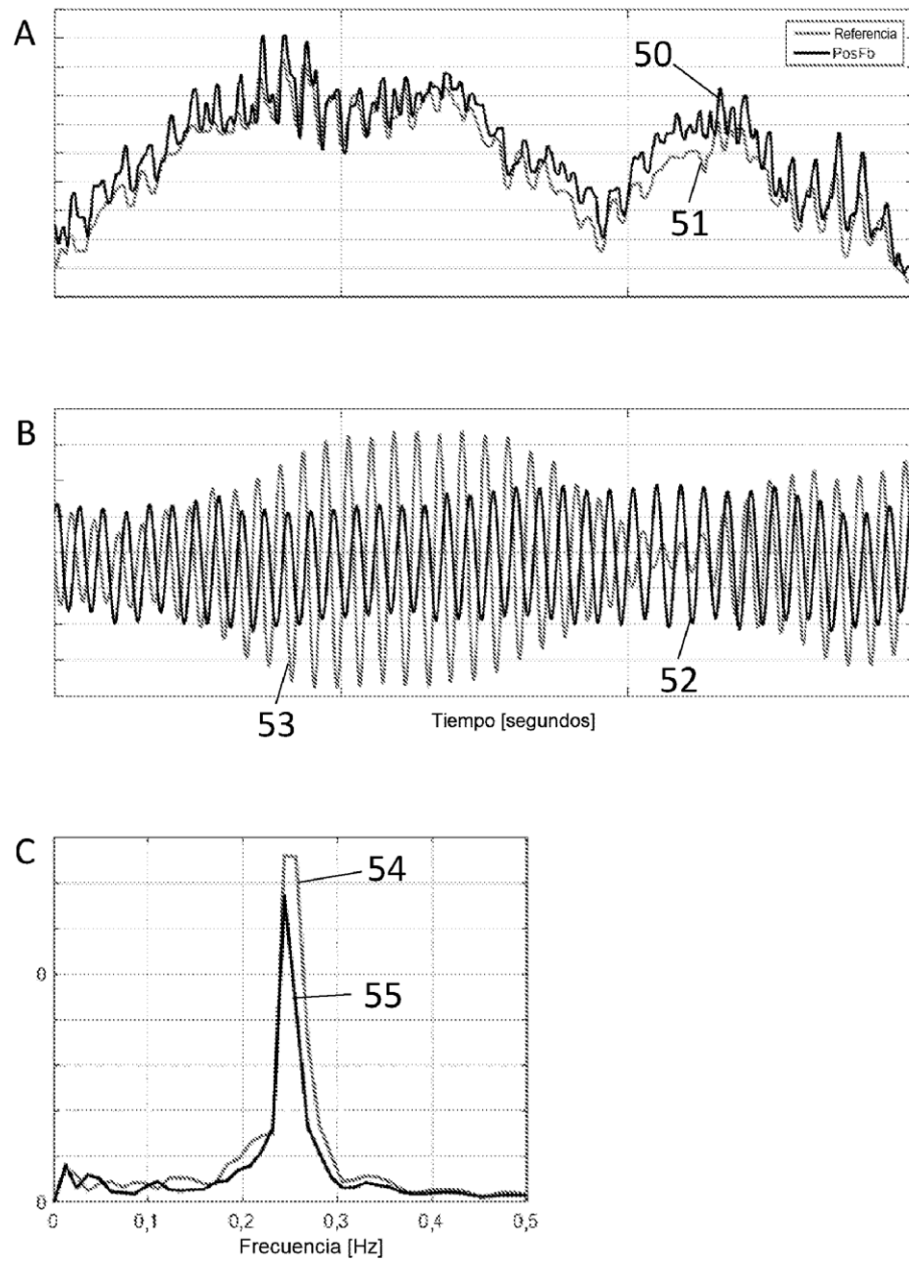


Fig. 5

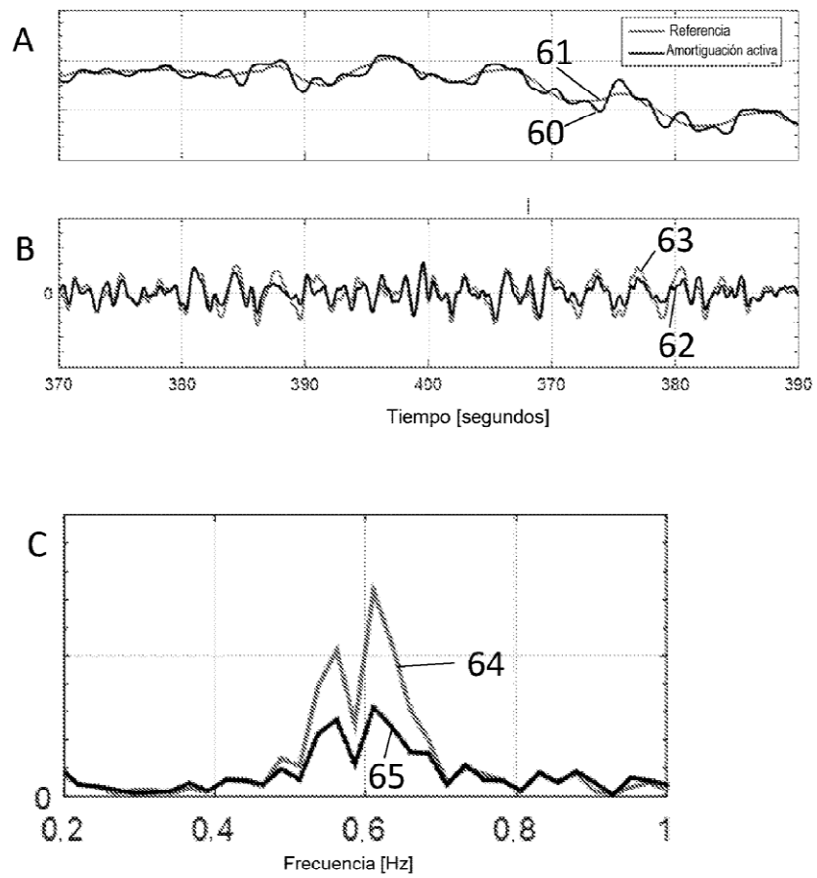


Fig. 6