

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 937 911**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 13/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.12.2018 PCT/DK2018/050320**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.06.2019 WO19114897**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.12.2018 E 18815940 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.02.2023 EP 3724488**

54 Título: **Amortiguación de la torre durante la producción de energía de una turbina eólica**

30 Prioridad:

14.12.2017 DK PA201770943

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

03.04.2023

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

CAPONETTI, FABIO y

THOMSEN, JESPER SANDBERG

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 937 911 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 la torre durante la producción de energía de una turbina eólica

5 Antecedentes

Campo de la invención

10 Las realizaciones presentadas en esta divulgación se relacionan por lo general con turbinas eólicas y, más específicamente, para controlar la producción de energía de una turbina eólica utilizando la información de estado dinámico de una torre de la turbina eólica.

Descripción de la técnica relacionada

15 Las turbinas eólicas comprenden por lo general una torre y una góndola ubicada en la parte superior de la torre. Las torres más altas son por lo general beneficiosas para producir mayores cantidades de energía eléctrica con la turbina eólica, puesto que una torre más alta puede admitir el uso de un rotor de mayor diámetro y/o disponer el rotor más lejos de los efectos negativos sobre el flujo de viento libre que se producen cerca del suelo (tales como el arrastre y la turbulencia a nivel de suelo).

20 Las torres más altas tienden a ser más flexibles, lo que puede dar lugar a interacciones dinámicas entre el movimiento de la torre y la celeridad del rotor. Por ejemplo, la celeridad del viento (y el par aerodinámico) que experimenta el rotor está influenciada por el movimiento superior de la torre. La producción de energía de la turbina eólica puede controlarse inclinando las palas de la turbina eólica para contrarrestar el par aerodinámico. El paso de las palas de la turbina eólica influye en las fuerzas que actúan sobre la torre y, por tanto, en el movimiento superior de la torre, lo que a su vez afecta la celeridad del viento experimentada y el par aerodinámico. En algunos casos, las interacciones dinámicas pueden introducir inestabilidad en el control de la turbina eólica.

25 Los documentos WO2013/065323 y TW201416549 desvelan ejemplos que aplican información de estado dinámico en el control de turbinas eólicas.

Sumario

35 La presente divulgación presenta un método que comprende determinar, utilizando una o más señales de sensor, la información de estado dinámico para una torre de una turbina eólica durante la producción de energía, en donde la información de estado dinámico comprende una frecuencia de la torre. El método comprende además determinar un primer valor de ganancia de bucle de control y un segundo valor de ganancia de bucle de control utilizando la frecuencia de la torre. El método comprende además generar, utilizando el primer valor de ganancia de bucle de control y el segundo valor de ganancia de bucle de control, una o más señales de control para controlar una celeridad de giro de un rotor de la turbina eólica.

45 Beneficiosamente, el método permite mitigar una inestabilidad introducida en el control de la turbina eólica que resulta de las interacciones dinámicas que ocurren entre el rotor y la torre. Además, teniendo en cuenta los efectos de la dinámica del rotor y/o la relación rotor-viento, la turbina eólica puede ajustarse de forma más agresiva, lo que da como resultado una mayor producción de energía de lo que sería posible de otro modo.

50 Otra realización descrita en el presente documento es un controlador para una turbina eólica, comprendiendo el controlador uno o más procesadores informáticos, y una memoria que comprende un código legible por ordenador que, cuando se ejecuta utilizando el uno o más procesadores informáticos, realiza una operación. La operación comprende determinar, utilizando una o más señales de sensor, la información de estado dinámico para una torre de una turbina eólica durante la producción de energía, en donde la información de estado dinámico comprende una frecuencia de la torre. La operación comprende además determinar un primer valor de ganancia de bucle de control y un segundo valor de ganancia de bucle de control utilizando la frecuencia de la torre. La operación comprende además generar, utilizando el primer valor de ganancia de bucle de control y el segundo valor de ganancia de bucle de control, una o más señales de control para controlar una celeridad de giro de un rotor de la turbina eólica.

55 Beneficiosamente, el controlador permite mitigar una inestabilidad introducida en el control de la turbina eólica que resulta de las interacciones dinámicas que ocurren entre el rotor y la torre. Además, teniendo en cuenta los efectos de la dinámica del rotor y/o la relación rotor-viento, la turbina eólica puede ajustarse de forma más agresiva, lo que da como resultado una mayor producción de energía de lo que sería posible de otro modo.

Breve descripción de los dibujos

65 Para que la forma en que las características de la presente divulgación mencionadas anteriormente se puedan entender en detalle, una descripción más particular de la divulgación, resumida en resumen anteriormente, se puede tener haciendo referencia a las realizaciones, algunos ejemplos de los que se ilustran en los dibujos adjuntos. Cabe

señalar, sin embargo, que los dibujos adjuntos ilustran únicamente las realizaciones convencionales de esta divulgación y, por lo tanto, no deben considerarse limitantes de su alcance, para que la divulgación pueda admitir otras realizaciones igualmente efectivas.

5 La Figura 1 ilustra una vista esquemática de una turbina eólica de ejemplo, de acuerdo con una o más realizaciones.

La Figura 2 es un diagrama de bloques de una turbina eólica de ejemplo, de acuerdo con una o más realizaciones.

10 La Figura 3 es un diagrama de bloques que ilustra el control de la celeridad de giro de un rotor de turbina eólica utilizando la información de estado dinámico de una torre de turbina eólica, de acuerdo con una o más realizaciones.

La Figura 4 es un diagrama de bloques que ilustra la determinación de los valores de ganancia de bucle de control utilizando la información de estado dinámico de una torre de turbina eólica, de acuerdo con una o más realizaciones.

15 La Figura 5 es un diagrama de bloques que ilustra la adaptación de una señal de referencia de paso durante la operación de carga parcial, de acuerdo con una o más realizaciones.

La Figura 6 ilustra un método de ejemplo para controlar la celeridad de giro de un rotor de turbina eólica utilizando la información de estado dinámico de una torre de turbina eólica, de acuerdo con una o más realizaciones.

20 La Figura 7 ilustra un método de ejemplo para adaptar una señal de referencia de paso durante la operación de carga parcial, de acuerdo con una o más realizaciones.

25 Para facilitar la comprensión, se han utilizado números de referencia idénticos, donde sea posible, para designar elementos idénticos que son comunes a las Figuras. Se contempla que los elementos desvelados en una realización se puedan utilizar de forma beneficiosa en otras realizaciones sin una descripción específica.

Descripción de las realizaciones de ejemplo

30 Las realizaciones divulgadas en el presente documento describen técnicas para adquirir información de estado dinámico de una torre de una turbina eólica durante la producción de energía, y para controlar la operación de la turbina eólica basándose en la información de estado dinámico.

35 La Figura 1 ilustra una vista esquemática de una turbina eólica de ejemplo 100. Aunque la turbina eólica 100 se ilustra como una turbina eólica de eje horizontal, los principios y técnicas descritos en el presente documento pueden aplicarse a otras implementaciones de turbinas eólicas, tales como turbinas eólicas de eje vertical. La turbina eólica 100 comprende normalmente una torre 102 y una góndola 104 ubicada en la parte superior de la torre 102. Un rotor 106 puede estar conectado con la góndola 104 a través de un eje de baja celeridad que se extiende fuera de la góndola 104. Como se muestra, el rotor 106 comprende tres palas del rotor 108 montadas en un cubo común 110 que giran en un plano de rotor, pero el rotor 106 puede comprender cualquier número adecuado de palas, tal como uno, dos, cuatro, cinco o más palas. Las palas 108 (o perfil aerodinámico) tienen normalmente, cada una, una forma aerodinámica con un borde de ataque 112 para orientarse hacia el viento, un borde de salida 114 en el extremo opuesto de una cuerda para las palas 108, una punta 116 y una raíz 118 para su unión al cubo 110 de cualquier forma adecuada.

45 Para algunas realizaciones, las palas 108 pueden estar conectadas al cubo 110 utilizando cojinetes de paso 120, de tal forma que cada pala 108 pueda girar 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 del rotor puede controlarse mediante accionadores lineales, accionadores hidráulicos o motores paso a paso, por ejemplo, conectados entre el cubo 110 y las palas 108.

50 Aunque no se muestra en la Figura 1, implementaciones alternativas de la turbina eólica 100 pueden incluir múltiples rotores 106 conectadas con la góndola 104 (o con múltiples góndolas 104). En tales implementaciones, la torre 102 puede comprender uno o más miembros estructurales que están configurados para proporcionar a los múltiples rotores 106 una disposición deseada (por ejemplo, con planos de rotor no superpuestos).

55 La Figura 2 es un diagrama de bloques de una turbina eólica de ejemplo 200, de acuerdo con una o más realizaciones. La turbina eólica 200 se puede utilizar junto con otras realizaciones descritas en el presente documento. Por ejemplo, la turbina eólica 200 representa una posible implementación de la turbina eólica 100 ilustrada en la Figura 1. La turbina eólica 200 comprende un controlador 205 acoplado con un controlador de paso 210 y con un generador de turbina eólica 215. El controlador 205 está configurado para recibir una o más señales de sensores 280 y generar una o más señales de control para controlar la celeridad de giro de un rotor de la turbina eólica 200.

65 El controlador 205 comprende uno o más procesadores informáticos (o "procesadores") y una memoria. El uno o más procesadores representan cualquier número de elementos de procesamiento, cada uno de los que puede incluir cualquier número de núcleos de procesamiento. Algunos ejemplos no limitativos de uno o más procesadores incluyen un microprocesador, un procesador de señal digital (DSP), un chip integrado de aplicación específica (ASIC) y una

matriz de puertas programables en campo (FPGA), o combinaciones de los mismos.

La memoria puede incluir elementos de memoria volátil (tales como memoria de acceso aleatorio), elementos de memoria no volátiles (tales como almacenamiento en estado sólido, magnético, óptico o basado en Flash) y combinaciones de los mismos. Es más, la memoria se puede distribuir a través de diferentes medios (por ejemplo, almacenamiento en red o discos duros externos). La memoria puede incluir una pluralidad de "módulos" para realizar diversas funciones descritas en el presente documento. En una realización, cada módulo incluye código de programa que es ejecutable por uno o más de los procesadores. Sin embargo, otras realizaciones pueden incluir módulos que están parcial o totalmente implementados en hardware (es decir, circuitos) o firmware.

La una o más señales de sensor 280 pueden comprender cualquier información adecuada relacionada con la dinámica del rotor y/o la dinámica de la torre. En un ejemplo no limitativo, la una o más señales de sensor 280 comprenden una celeridad del generador de turbina eólica 215 y una aceleración de la torre.

En algunas realizaciones, el controlador 205 comprende un módulo de control de carga 225, un módulo de control de carga parcial 230 y un módulo de amortiguación 235 de la torre. El módulo de control de carga 225 está configurado para controlar la producción de energía del generador de turbina eólica 215 durante condiciones de viento que son adecuadas para producir al menos una potencia nominal de la turbina eólica 200. El módulo de control de carga parcial 230 está configurado para controlar la producción de energía del generador de turbina eólica 215 durante condiciones de viento que no son adecuadas para producir la potencia nominal de la turbina eólica 200. Por ejemplo, el módulo de control de carga 225 puede controlar la producción de energía cuando la celeridad del viento medida es mayor o igual a la celeridad nominal del viento de la turbina eólica 200, y el módulo de control de carga parcial 230 puede controlar la producción de energía cuando la celeridad del viento medida es menor que la celeridad nominal del viento.

El generador de turbina eólica 215 puede tener cualquier implementación adecuada, tal como un generador síncrono, un generador de inducción, un generador de imanes permanentes, y así sucesivamente. Además, el generador de turbina eólica 215 puede configurarse como un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), para la conversión de energía a gran escala, y así sucesivamente.

En algunas realizaciones, el módulo de control de carga 225 opera para controlar el paso de una o más palas del rotor para evitar condiciones no deseadas de la turbina eólica 200. Por ejemplo, el módulo de control de carga 225 puede inclinar las palas del rotor fuera del viento para evitar que el generador de turbina eólica 215 tenga una condición de exceso de celeridad. En algunas realizaciones, el módulo de control de carga parcial 230 opera para controlar el paso de una o más palas del rotor a un ángulo de paso óptimo. Aunque el generador de turbina eólica 215 no puede producir la potencia nominal mientras opera en el régimen de control de carga parcial, el ángulo de paso óptimo permite capturar una cantidad máxima de energía del viento mientras aumenta la celeridad del generador de turbina eólica 215. Como se ha mencionado anteriormente, el controlador 205 puede pasar del régimen de control de carga parcial al régimen de control de carga total cuando la celeridad del viento medida alcanza una celeridad nominal del viento de la turbina eólica.

En algunas realizaciones, el módulo de control de carga 225 y el módulo de control de carga parcial 230 pueden implementarse dentro de un controlador de celeridad 220 del rotor. El controlador de celeridad 220 del rotor responde por lo general a la dinámica del rotor y puede ser insensible o agnóstico a la dinámica de la torre. El controlador de celeridad 220 del rotor puede comprender además una lógica de conmutación configurada para determinar cuándo cambiar entre los respectivos regímenes de control proporcionados por el módulo de control de carga 225 y el módulo de control de carga parcial 230. En algunas realizaciones, la lógica de conmutación recibe la celeridad del viento medida como entrada y puede recibir información de una u otras condiciones del viento y/o condiciones de la turbina eólica.

El módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para determinar información de estado dinámico (información de estado 240) para una torre de la turbina eólica 200 y para generar una o más señales de control para controlar la celeridad de giro del rotor. En algunas realizaciones, la información de estado 240 comprende una o más de información de aceleración, información de velocidad e información de posición para la torre junto a una o más dimensiones adecuadas. En algunas realizaciones, los sensores 250 incluyen un acelerómetro dispuesto en una ubicación de referencia de la torre, y la una o más señales de sensor 280 comprenden información de aceleración proporcionada por el acelerómetro. Por ejemplo, el acelerómetro puede estar dispuesto en la parte superior de la torre, aunque también son posibles otras ubicaciones. En algunas realizaciones, el módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para generar información de velocidad y/o información de posición utilizando la información de aceleración recibida. En otras realizaciones, los sensores 250 pueden comprender uno o más sensores que están configurados para medir directamente la información de velocidad y/o la información de posición de la torre, que se pueden proporcionar al módulo de amortiguación 235 de la torre.

En algunas realizaciones, la información de estado 240 comprende una frecuencia 245 de la torre junto a una o más dimensiones adecuadas. La frecuencia 245 de la torre puede comprender una frecuencia fundamental de la torre. Algunos ejemplos no limitativos de las dimensiones adecuadas incluyen una dimensión longitudinal que corresponde por lo general a la dirección del viento en la turbina eólica 200 (por ejemplo, suponiendo que el rotor gira para alinearse

con la dirección del viento), y una dimensión de lado a lado que es por lo general ortogonal a la dirección del viento. En otro ejemplo que involucra una turbina eólica que comprende múltiples rotores, la frecuencia 245 de la torre puede comprender una torsión alrededor de la torre.

5 En algunas realizaciones, el módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para determinar la frecuencia 245 de la torre utilizando al menos una información de velocidad e información de posición. Por ejemplo, el módulo de amortiguación 235 de la torre puede determinar la información de frecuencia (o "contenido de frecuencia") que se incluye en la información de posición, por ejemplo, realizando una transformada rápida de Fourier (FFT) en la información de posición. También son posibles otras técnicas de análisis de frecuencia. Por lo general, una mayor frecuencia 245 de la torre corresponde a una torre más rígida, y una menor frecuencia 245 de la torre corresponde a una torre más flexible. En un ejemplo no limitativo, la determinación de la frecuencia 245 de la torre puede ser realizada dinámicamente por el módulo de amortiguación 235 de la torre durante la producción de energía de la turbina eólica. En otro ejemplo no limitativo, la determinación de la frecuencia 245 de la torre puede ser realizada por el módulo de amortiguación 235 de la torre durante un período de parada de la turbina eólica. En otro ejemplo no limitativo, la determinación de la frecuencia 245 de la torre se puede realizar durante un proceso de puesta en marcha de la turbina eólica. En otro ejemplo no limitativo, la frecuencia 245 de la torre se puede proporcionar al módulo de amortiguación 235 de la torre a través de la entrada del usuario.

20 Como se ha mencionado anteriormente, el módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para generar una o más señales de control utilizando la información de estado 240. En algunas realizaciones, el controlador de celeridad 220 del rotor (más específicamente, uno seleccionado del módulo de control de carga 225 y del módulo de control de carga parcial 230) está configurado para generar una señal de referencia de paso 255, y el módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para producir una señal de compensación de referencia de paso 260 que se combina con la señal de referencia de paso 255. En algunas realizaciones, la señal de referencia de paso 255 corresponde a una producción de energía ordenada de la turbina eólica, ya sea desde el módulo de control de carga 225 o desde el módulo de control de carga parcial 230. En algunas realizaciones, el controlador 205 puede sumar la señal de referencia de paso 255 con la señal de compensación de referencia de paso 260 en un sumador 265, que emite una señal de referencia de paso 270.

30 En algunas realizaciones, el controlador 205 proporciona la señal de referencia de paso 270 a un controlador de paso 210 para controlar el paso de una o más palas del rotor de la turbina eólica 200. A su vez, el controlador de paso 210 emite valores de paso 275 para controlar el generador de turbina eólica 215 (más específicamente, una celeridad de giro del rotor). En algunas realizaciones, el controlador de paso 210 se implementa por separado del controlador 205. En realizaciones alternativas, la funcionalidad del controlador de paso 210 puede integrarse en el controlador 205.

35 Por tanto, con la funcionalidad proporcionada por el módulo de amortiguación 235 de la torre, el controlador 205 puede responder a la dinámica del rotor, dinámica de la torre y una relación rotor-viento. En algunas realizaciones, la relación rotor-viento comprende una celeridad efectiva del viento experimentada en el rotor, que puede representarse como una diferencia entre la celeridad del viento libre y la velocidad de la torre. Además, al tener en cuenta los efectos de la dinámica del rotor y/o la relación rotor-viento utilizando el módulo de amortiguación 235 de la torre se permite que el módulo de control de carga 225 se sintonice más agresivamente de lo que sería posible de otro modo. Todavía además, aunque descrito anteriormente en términos de la dinámica de la torre, se observará que las técnicas discutidas con relación al módulo de amortiguación 235 de la torre pueden ser aplicables a otros tipos de estructuras para mitigar inestabilidades torsionales.

45 La Figura 3 es un diagrama de bloques 300 que ilustra el control de la celeridad de giro de un rotor de turbina eólica utilizando la información de estado dinámico de una torre de turbina eólica, de acuerdo con una o más realizaciones. Las características ilustradas en el diagrama de bloques 300 se pueden utilizar junto con otras realizaciones descritas en el presente documento, tal como el controlador 205 ilustrado en la Figura 2.

50 El controlador de celeridad 220 del rotor está configurado para recibir una celeridad del generador ω desde un sensor de celeridad 350 del rotor y una celeridad de referencia ω_{ref} del generador. Un restador 340 del controlador de celeridad 220 del rotor genera una señal de error basada en una diferencia de la celeridad ω del generador y la celeridad de referencia ω_{ref} del generador. Un controlador proporcional integral (PI) 345 genera una señal de referencia de paso 255 utilizando la señal de error.

60 El módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para recibir una aceleración α_{Torre} de la torre de un acelerómetro 355 de la torre. El módulo de amortiguación 235 de la torre comprende un módulo de filtro 302 configurado para filtrar la aceleración α_{Torre} de la torre para producir información de aceleración filtrada 304. Un primer integrador 305 está configurado para producir información de velocidad 310 a partir de la información de aceleración filtrada 304, y un segundo integrador 315 está configurado para producir información de posición 320 a partir de la información de velocidad 310.

65 Como se ha analizado anteriormente, en otras realizaciones, los sensores 250 pueden comprender uno o más sensores que están configurados para medir directamente la información de velocidad 310 y/o la información de posición 320.

- El módulo de filtro 302 puede comprender una o más etapas de filtrado para producir la información de aceleración filtrada 304. En algunas realizaciones, el módulo de filtro 302 puede configurarse para eliminar los componentes de baja frecuencia de la aceleración α_{Torre} de la torre, tales como componentes de corriente continua (CC). En algunas realizaciones, el módulo de filtro 302 puede configurarse para realizar suavizado de la aceleración α_{Torre} de la torre. En algunas realizaciones, el módulo de filtro 302 puede configurarse para filtrar los componentes de frecuencia asociados con la giro del rotor, tal como una frecuencia 3P. Puede seleccionarse cualquier frecuencia de corte adecuada para las diversas etapas de filtrado. Además, las etapas de filtrado pueden actualizarse de forma adaptativa durante la operación de la turbina eólica, por ejemplo, basándose en las condiciones del viento.
- En algunas realizaciones, el primer integrador 305 y/o el segundo integrador 310 pueden implementarse como integradores "con fugas" (por ejemplo, un filtro de paso bajo (LPF) de primer orden que tiene una frecuencia de corte significativamente menor que las frecuencias de interés). Por ejemplo, las frecuencias de corte para el primer integrador 305 y/o el segundo integrador 310 pueden seleccionarse para evitar introducir demasiado adelanto de fase en frecuencias cercanas a la frecuencia 245 de la torre.
- Un primer amplificador 325 del módulo de amortiguación 235 de la torre tiene un primer valor de ganancia de bucle de control (es decir, ganancia de velocidad A_v) que se aplicará a la información de velocidad 310. Un segundo amplificador 330 del módulo de amortiguación 235 de la torre tiene un segundo valor de ganancia de bucle de control (es decir, ganancia de posición A_p) que se aplicará a la información de posición 320. Un sumador 335 suma las salidas del primer amplificador 325 y del segundo amplificador 330 para producir la señal de compensación de referencia de paso 260. El sumador 265 recibe la señal de referencia de paso 255 y la señal de compensación de referencia de paso 260, y emite la señal de referencia de paso 270.
- En algunas realizaciones, el valor de ganancia del primer bucle de control y/o el valor de ganancia del segundo bucle de control pueden actualizarse dinámicamente utilizando la información de estado dinámico para la torre de la turbina eólica. Por ejemplo, al menos un valor de ganancia de bucle de control puede determinarse utilizando una frecuencia determinada de la torre.
- Como se muestra, el módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para emitir una señal de compensación de referencia de paso 260 que tiene una componente de velocidad basada en la información de velocidad 310 y una componente de posición basada en la información de posición 320. En una implementación alternativa, la señal de compensación de referencia de paso 260 puede tener solo uno de los componentes de velocidad y componente de posición. En otra implementación alternativa, la señal de compensación de referencia de paso 260 puede tener una componente de aceleración basada en la aceleración α_{Torre} de la torre. La componente de aceleración puede ser adicional a, o puede estar separada de, la componente de velocidad y/o la componente de posición.
- En algunas realizaciones, el módulo de amortiguación 235 de la torre tiene un ajuste predefinido específico para la plataforma de la turbina eólica. El ajuste predefinido puede comprender un primer conjunto predefinido de valores (por ejemplo, la ganancia de velocidad A_v y/o la ganancia de posición A_p), que pueden actualizarse después de forma adaptativa durante la operación de la turbina eólica. De este modo, el módulo de amortiguación 235 de la torre puede implementarse para varias turbinas eólicas independientemente de su ubicación geográfica. Dicho de otra manera, el módulo de amortiguación 235 de la torre no requiere que se realice un ajuste específico del sitio antes de la operación de la turbina eólica.
- La Figura 4 es un diagrama de bloques 400 que ilustra la determinación de los valores de ganancia de bucle de control utilizando la información de estado dinámico de una torre de turbina eólica, de acuerdo con una o más realizaciones. Las características ilustradas en el diagrama de bloques 400 se pueden utilizar junto con otras realizaciones descritas en el presente documento, tal como se implementa en el módulo de amortiguación 325 de la torre representado en la Figura 3. Además, las características ilustradas en el diagrama de bloques 400 pueden usarse durante la operación a plena carga y/o durante la operación de carga parcial de la turbina eólica.
- En algunas realizaciones, un módulo de adaptación 405 está configurado para determinar al menos un valor de ganancia de bucle de control utilizando una frecuencia f_{Torre} de la torre. Como se ha analizado anteriormente, la frecuencia f_{Torre} de la torre puede determinarse utilizando la información de frecuencia incluida en la información de posición. El módulo de adaptación 405 comprende un primer módulo de programación de ganancia 415 configurado para programar un primer valor de ganancia de bucle de control (es decir, ganancia de velocidad A_v), y un segundo módulo de programación de ganancia 420 configurado para programar un segundo valor de ganancia de bucle de control (es decir, ganancia de posición A_p).
- Como se muestra, el primer valor de ganancia de bucle de control y el segundo valor de ganancia de bucle de control se seleccionan, cada uno, dentro de un intervalo entre cero (0) y uno (1). Las implementaciones alternativas pueden programar el primer valor de ganancia de bucle de control y/o el segundo valor de ganancia de bucle de control desde cualquier intervalo adecuado. Además, el intervalo para el primer valor de ganancia de bucle de control y el intervalo para el segundo valor de ganancia de bucle de control no necesitan ser iguales.

Para valores de la frecuencia f_{Torre} de la torre que son menores que una primera frecuencia umbral $f_{\text{apagado,v}}$, la ganancia de velocidad A_v tiene un valor cero. Para valores de la frecuencia de la torre f_{Torre} que son mayores que una segunda frecuencia umbral $f_{\text{encendido,v}}$, la ganancia de velocidad A_v tiene un valor uno. Para valores de la frecuencia f_{Torre} de la torre entre la primera frecuencia umbral $f_{\text{apagado,v}}$ y la segunda frecuencia umbral $f_{\text{encendido,v}}$, la ganancia de velocidad A_v tiene valores adaptados de acuerdo con una función predefinida. Por tanto, en algunas realizaciones, el módulo de adaptación 405 está configurado para, en respuesta a la determinación de que la frecuencia f_{Torre} de la torre es menor que una primera frecuencia umbral $f_{\text{apagado,v}}$, desactivar o desajustar un primer bucle de control asociado con el primer valor de ganancia de bucle de control (ganancia de velocidad A_v). Beneficiosamente, ciertos efectos de la retroalimentación basada en la velocidad se pueden mitigar desactivando o desajustando el primer bucle de control, tales como mitigar un efecto desestabilizador cuando se emplean con torres relativamente flexibles.

Para valores de la frecuencia f_{Torre} de la torre que son menores que una primera frecuencia umbral $f_{\text{encendido,p}}$, la ganancia de posición A_p tiene un valor uno. Para valores de la frecuencia de la torre f_{Torre} que son mayores que una segunda frecuencia umbral $f_{\text{apagado,p}}$, la ganancia de posición A_p tiene un valor cero. Para valores de la frecuencia f_{Torre} de la torre entre la primera frecuencia umbral $f_{\text{encendido,p}}$ y la segunda frecuencia umbral $f_{\text{apagado,p}}$, la ganancia de posición A_p tiene valores adaptados de acuerdo con una función predefinida. Por tanto, en algunas realizaciones, el módulo de adaptación 405 está configurado para, en respuesta a la determinación de que la frecuencia f_{Torre} de la torre es mayor que una segunda frecuencia umbral $f_{\text{apagado,p}}$, desactivar o desajustar un segundo bucle de control asociado con el segundo valor de ganancia de bucle de control (ganancia de posición A_p).

En algunas realizaciones, las funciones predefinidas asociadas con la ganancia de velocidad A_v y la ganancia de posición A_p son sustancialmente lineales. Sin embargo, también se contemplan otras funciones adecuadas (por ejemplo, cuadráticas).

En algunas realizaciones, un módulo de adaptación opcional 410 está configurado para recibir el primer valor de ganancia de bucle de control (ganancia de velocidad A_v) y el segundo valor de ganancia del lazo de control (ganancia de posición A_p), y para generar valores de ganancia de bucle de control adaptados A'_v , A'_p que se aplicarán a los bucles de control respectivos. De este modo, el módulo de adaptación 410 puede mitigar ciertos efectos de la retroalimentación basada en la velocidad y/o de la retroalimentación basada en la posición. Por ejemplo, el módulo de adaptación 410 puede limitar la aplicación de los valores de ganancia de bucle de control para mitigar el desgaste del sistema de paso. El módulo de adaptación 410 comprende un primer módulo de programación de ganancias 425 configurado para programar un primer valor de ganancia adaptado, y un segundo módulo de programación de ganancias 430 configurado para programar un segundo valor de ganancia adaptado.

Para valores de una aceleración media $\alpha_{\text{Torre,RMS}}$ de la torre que son menores que un primer umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{apagado,v}}$, el primer módulo de programación de ganancias 425 emite un valor cero. Para valores de la aceleración media $\alpha_{\text{Torre,RMS}}$ de la torre que son mayores que un segundo umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{encendido,v}}$, el primer módulo de programación de ganancias 425 emite un valor uno. Para valores de la aceleración media $\alpha_{\text{Torre,RMS}}$ de la torre entre el primer umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{apagado,v}}$ y el segundo umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{encendido,v}}$, el primer módulo de programación de ganancias 425 emite valores adaptados de acuerdo con una función predefinida. El valor emitido por el primer módulo de programación de ganancia 425 y el primer valor de ganancia de bucle de control (ganancia de velocidad A_v) se comparan en un bloque de mínimo 435 y el valor mínimo se emite como el valor de ganancia de bucle de control adaptado A'_v .

Por tanto, en algunas realizaciones, el primer módulo de programación de ganancias 425 está configurado para habilitar, deshabilitar, o de otro modo limitar la funcionalidad del primer módulo de programación de ganancias 415. Por ejemplo, el primer módulo de programación de ganancias 425 puede mitigar el desgaste del sistema de paso habilitando el primer módulo de programación de ganancias 415 solo cuando las oscilaciones de la torre exceden una amplitud predefinida.

Para valores de la aceleración media $\alpha_{\text{Torre,RMS}}$ de la torre que son menores que un primer umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{apagado,p}}$, el segundo módulo de programación de ganancias 430 emite un valor cero. Para valores de la aceleración media $\alpha_{\text{Torre,RMS}}$ de la torre que son mayores que un segundo umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{encendido,p}}$, el segundo módulo de programación de ganancias 430 emite un valor uno. Para valores de la aceleración media $\alpha_{\text{Torre,RMS}}$ de la torre entre el primer umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{apagado,p}}$ y el segundo umbral de aceleración $\text{RMS}_{\text{encendido,p}}$, el segundo módulo de programación de ganancias 430 emite valores adaptados de acuerdo con una función predefinida. El valor emitido por el segundo módulo de programación de ganancia 430 y el segundo valor de ganancia de bucle de control (ganancia de posición A_p) se comparan en un bloque de mínimo 440 y el valor mínimo se emite como el valor de ganancia de bucle de control adaptado A'_p .

Por tanto, en algunas realizaciones, el segundo módulo de programación de ganancias 430 está configurado para habilitar, deshabilitar, o limitar de otro modo la funcionalidad del segundo módulo de programación de ganancias 420. Por ejemplo, el primer módulo de programación de ganancia 425 se puede utilizar para evitar la aplicación de valores pequeños de la señal de compensación de referencia de paso durante la operación a plena carga.

Aunque no se muestra explícitamente, en algunas realizaciones, el módulo de adaptación 405 puede comprender un

módulo de programación de ganancia adicional que afecta a la ganancia de posición A_p en función del punto operativo de la turbina eólica. El módulo de control de carga (por ejemplo, el módulo de control de carga 225 de la Figura 2) puede incluir una funcionalidad comparable. No es necesario que los valores de salida del módulo de programación de ganancia adicional estén vinculados a un intervalo de cero a uno, sino que pueden tener cualquier valor adecuado.

5 La Figura 5 es un diagrama de bloques 500 que ilustra la adaptación de una señal de referencia de paso durante la operación de carga parcial, de acuerdo con una o más realizaciones. Las características ilustradas en el diagrama de bloques 500 se pueden utilizar junto con otras realizaciones descritas en el presente documento, tal como se implementa en el controlador 205 representado en la Figura 2.

10 El módulo de control de carga parcial 230 está configurado para producir la señal de referencia de paso 255. En algunas realizaciones, la señal de referencia de paso 255 refleja un ángulo de paso colectivo máximo de una pluralidad de ángulos de paso calculados por el módulo de control de carga parcial 230 de acuerdo con uno o más parámetros predefinidos. Por ejemplo, el módulo de control de carga parcial 230 puede calcular un primer ángulo de paso correspondiente a un nivel máximo (u otro deseado) de producción de energía, un segundo ángulo de paso correspondiente a un parámetro de limitación de empuje, un tercer ángulo de paso correspondiente a un parámetro de limitación de ruido, un cuarto ángulo de paso correspondiente a un parámetro de error de guiñada, y así sucesivamente.

20 El módulo de amortiguación 235 de la torre está configurado para producir la señal de compensación de referencia de paso 260, y el sumador 265 está configurado para enviar la señal de referencia de paso 510 a un bloque de saturación 505. La señal de referencia de paso 510 y una señal de referencia de paso de saturación 515 se comparan en el bloque de saturación 505 y el valor máximo se emite como una señal de referencia de paso máxima 520. El uso de la señal de referencia de paso máxima 520 puede ser beneficioso para evitar que las palas del rotor se detengan, reducir las emisiones de ruido, y así sucesivamente.

30 En algunas realizaciones, la señal de referencia de paso de saturación 515 comprende la señal de referencia de paso 255. En un caso de este tipo, el controlador 205 permite que las palas del rotor solo se inclinen fuera del viento desde el ángulo de paso ordenado por la señal de referencia de paso 255. Dicho de otra manera, el valor de la señal de referencia de paso máxima 520 no será menor que la señal de referencia de paso 255 antes de la aplicación de la funcionalidad de amortiguación de la torre. En otras realizaciones, la señal de referencia de paso de saturación 515 comprende una señal de referencia de paso correspondiente a un nivel máximo de producción de energía para un punto operativo de la turbina eólica. El nivel máximo de producción de energía corresponde por lo general a un ángulo de paso en el que la turbina eólica extrae la mayor cantidad de energía posible del viento. En este caso, la señal de referencia de paso de saturación 515 puede comprender además una compensación de paso. Para una implementación de este tipo, el controlador 205 permite que las palas del rotor se incline hacia el viento dependiendo del punto operativo de la turbina eólica (por ejemplo, durante la operación con limitación de empuje). Dicho de otra manera, para una implementación del módulo de control de carga parcial 230 que comprende un primer ángulo de paso correspondiente al nivel máximo de producción de energía y al menos un segundo ángulo de paso correspondiente a otro parámetro operativo (tal como la limitación de empuje, limitación de ruido, error de guiñada, etc.), el valor de la señal de referencia de paso máxima 520 puede ser menor que la señal de referencia de paso 255 cuando el módulo de control de carga parcial 230 se controla de acuerdo con el segundo ángulo de paso. Otras implementaciones del controlador 205 pueden incluir cualquier otra señal adecuada como la señal de referencia de paso de saturación 515.

45 Durante la operación de carga parcial, el módulo de amortiguación 235 de la torre puede sufrir errores de estimación para frecuencias que son más bajas que la frecuencia 245 de la torre. Estos errores de estimación pueden amplificarse cuando se estima la información de velocidad y la información de posición a partir de la información de aceleración medida, y pueden reflejarse en la señal de compensación de referencia de paso 260. Los errores de estimación pueden no tener un efecto sustancial durante la operación a plena carga, ya que la señal de compensación de referencia de paso 260 puede verse como una perturbación que se produce entre el controlador 205 y el sistema de paso. Sin embargo, los errores de estimación pueden tener un efecto más sustancial durante la operación de carga parcial.

55 Normalmente, el módulo de control de carga parcial 230 puede controlar la celeridad del rotor regulando una referencia de potencia, mientras que el ángulo de paso correspondiente puede determinarse a través de tablas de consulta y/o relaciones con cantidades medidas a partir de una o más señales de sensor 280 (por ejemplo, celeridad del rotor, celeridad del viento, etc.). Durante la operación de carga parcial, ya que no hay un control de bucle cerrado para el ángulo de paso (por ejemplo, incluyendo un integrador), las variaciones de baja frecuencia introducidas por el módulo de amortiguación 235 de la torre pueden introducirse directamente en el ángulo de paso comandado de la señal de compensación de referencia de paso 260, lo que provoca variaciones de empuje a baja frecuencia y puede dificultar el rendimiento de la turbina eólica.

60 Para mitigar la amplificación del contenido a baja frecuencia que puede ocurrir durante la operación de carga parcial, en algunas realizaciones, el controlador 205 está configurado para volver a sintonizar los filtros del módulo de amortiguación 235 de la torre (por ejemplo, el módulo de filtro 302, el primer integrador 305 y/o el segundo integrador 310 de la Figura 3). Por ejemplo, el controlador 205 puede volver a ajustar uno o más filtros de paso alto (HPF) del

módulo de amortiguación 235 de la torre para que estén más cerca de la región operativa para mitigar el contenido a baja frecuencia a expensas del adelanto de fase en frecuencias cercanas a la frecuencia 245 de la torre. Sin embargo, en algunos casos, los filtros reajustados pueden corresponder a un rendimiento reducido durante la operación a plena carga. Por lo tanto, en algunas realizaciones, el controlador 205 puede volver a ajustar el uno o más filtros en respuesta a la transición a la operación de carga parcial. En algunas realizaciones, el controlador 205 puede volver a ajustar los filtros (por ejemplo, devolver los filtros a su ajuste original) en respuesta a la transición a la operación a plena carga.

La Figura 6 ilustra un método de ejemplo 600 para controlar la celeridad de giro de un rotor de turbina eólica utilizando la información de estado dinámico de una torre de turbina eólica, de acuerdo con una o más realizaciones. El método 600 se puede utilizar junto con otras realizaciones, tal como se realiza utilizando el controlador 205 representado en la Figura 2.

El método 600 comienza en el bloque 605, donde el controlador determina, utilizando una o más señales de sensor, la información de estado dinámico para una torre de una turbina eólica durante la producción de energía. En algunas realizaciones, la información de estado dinámico comprende una frecuencia de la torre. En el bloque 615, el controlador determina al menos un valor de ganancia de bucle de control utilizando la frecuencia de la torre. En algunas realizaciones, el controlador determina un primer valor de ganancia de bucle de control que se aplicará a la información de velocidad correspondiente en una ubicación de referencia de la torre, y un segundo valor de ganancia de bucle de control que se aplicará a la información de posición correspondiente en la ubicación de referencia. En el bloque 625, el controlador genera, utilizando al menos un valor de ganancia de bucle de control, una o más señales de control para controlar una celeridad de giro de un rotor de la turbina eólica. En algunas realizaciones, la una o más señales de control comprenden una señal de referencia de paso para controlar el paso de una o más palas del rotor de la turbina eólica. El método 600 termina después de completar el bloque 625.

La Figura 7 ilustra un método de ejemplo 700 para adaptar una señal de referencia de paso durante la operación de carga parcial, de acuerdo con una o más realizaciones. El método 600 se puede utilizar junto con otras realizaciones, tal como se realiza utilizando el controlador 205 representado en la Figura 5.

El método 700 comienza en el bloque 705, donde el controlador genera, utilizando al menos una primera señal del sensor, una primera señal de referencia de paso para una o más palas del rotor de una turbina eólica durante la operación de carga parcial. En algunas realizaciones, la primera señal del sensor comprende una señal de celeridad de giro. En el bloque 715, el controlador determina, utilizando al menos una segunda señal de sensor, la información de estado dinámico de una torre de la turbina eólica. En algunas realizaciones, la segunda señal del sensor comprende una señal de aceleración de la torre. En algunas realizaciones, la información de estado dinámico comprende una frecuencia de la torre.

En el bloque 725, el controlador genera una segunda señal de referencia de paso adaptando la primera señal de referencia de paso utilizando la información de estado dinámico. En algunas realizaciones, generar la segunda señal de referencia de paso comprende generar una señal de compensación de referencia de paso utilizando la información de estado dinámico. En algunas realizaciones, adaptar la primera señal de referencia de paso comprende sumar la señal de compensación de referencia de paso con la primera señal de referencia de paso.

En el bloque 735, el controlador selecciona una señal de referencia de paso máxima a partir de la segunda señal de referencia de paso y una señal de referencia de paso de saturación. En algunas realizaciones, la señal de referencia de paso de saturación es la misma que la primera señal de referencia de paso. En otras realizaciones, la señal de referencia de paso de saturación corresponde a un nivel máximo de producción de potencia.

En el bloque 745, el controlador comunica la señal de referencia de paso máxima para controlar un paso de una o más palas del rotor. En algunas realizaciones, el controlador comunica la señal de referencia de paso máxima con un controlador de paso externo. El método 700 termina después de completar el bloque 745.

En lo anterior, se hace referencia a las realizaciones presentadas en esta divulgación. Sin embargo, el alcance de la presente divulgación no se limita a las realizaciones específicas descritas. En su lugar, cualquier combinación de las características y elementos proporcionados anteriormente, ya sea relacionada con diferentes realizaciones o no, se contempla para implementar y poner en práctica las realizaciones contempladas. Asimismo, aunque las realizaciones divulgadas en el presente documento pueden lograr ventajas sobre otras posibles soluciones o sobre la técnica anterior, el hecho de que se logre o no una ventaja particular mediante una realización dada no es una limitación del alcance de la presente divulgación. Por tanto, los aspectos, características, realizaciones y ventajas descritos en el presente documento son meramente ilustrativas y no se consideran elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas, excepto cuando se mencionan explícitamente en una o más reivindicaciones.

Como apreciará un experto en la materia, las realizaciones divulgadas 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 totalmente de hardware, una realización totalmente de software (incluido firmware, software residente, microcódigo, etc.) o una realización que combina aspectos de software y hardware que generalmente pueden denominarse en el presente documento un "circuito", "módulo" o "sistema". Asimismo, los aspectos pueden

adoptar la forma de un producto de programa informático incorporado en uno o más medios legibles por ordenador que tienen un código de programa legible por ordenador incorporado en el mismo.

5 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 (por ejemplo, un disquete de ordenador portátil, un disco duro, una memoria de acceso aleatorio (RAM), una memoria de solo lectura (ROM), una memoria de solo lectura programable y borrable (EPROM o memoria Flash), una fibra óptica, una memoria de solo lectura de disco compacto (CD-ROM) portátil, un dispositivo de almacenamiento óptico, un dispositivo de almacenamiento magnético, o cualquier combinación adecuada de los anteriores) que tiene instrucciones de programa
10 legibles por ordenador para hacer que un procesador lleve a cabo los aspectos de la presente invención.

Los aspectos de la presente divulgación se describen a continuación con referencia a ilustraciones de diagramas de flujo y/o diagramas de bloques de métodos, aparatos (sistemas) y productos de programas informáticos según las realizaciones presentadas en esta descripción. Se entenderá que cada bloque de las ilustraciones de diagramas de flujo y/o diagramas de bloques, y las combinaciones de bloques en las ilustraciones de diagramas de flujo y/o diagramas de bloques, se pueden poner en marcha mediante instrucciones de los programas informáticos. Estas instrucciones de programas informáticos se pueden proporcionar a un procesador de un ordenador universal, ordenador especializado u otro aparato de procesamiento de datos programable para producir una máquina, de manera que las instrucciones, que se ejecutan por medio del procesador del ordenador u otro aparato de procesamiento de datos programable, creen medios para implementar las funciones/acciones especificadas en el diagrama de flujo y/o el bloque o los bloques del diagrama de bloques.
15
20

El diagrama de flujo y los diagramas de bloques en las Figuras ilustran la arquitectura, funcionalidad y operación de posibles implementaciones de sistemas, métodos y productos de programas informáticos de acuerdo con diversas realizaciones. En este sentido, cada bloque en el diagrama de flujo o en los diagramas de bloques puede representar un módulo, segmento o porción de código, que comprende una o más instrucciones ejecutables para implementar la una o más funciones lógicas especificadas. También cabe señalar que, en algunas implementaciones alternativas, las funciones observadas en el bloque pueden producirse fuera del orden observado en las Figuras. Por ejemplo, dos bloques mostrados en sucesión pueden, de hecho, ejecutarse sustancialmente al mismo tiempo, o los bloques a veces pueden ejecutarse en el orden inverso, dependiendo de la funcionalidad involucrada. También se observará que cada bloque de los diagramas de bloques y/o la ilustración del diagrama de flujo, y las combinaciones de bloques en los diagramas de bloques y/o la ilustración del diagrama de flujo, pueden implementarse mediante sistemas basados en hardware de propósito especial que realizan las funciones o acciones especificadas, o combinaciones de hardware de propósito especial e instrucciones informáticas.
25
30
35

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

REIVINDICACIONES

1. Un método que comprende:

5 determinar (605), utilizando una o más señales de sensor, la información de estado dinámico para una torre de una turbina eólica durante la producción de energía, en donde la información de estado dinámico comprende determinar la información de velocidad y la información de posición correspondiente a una ubicación de referencia de la torre y a una frecuencia de la torre, la frecuencia de la torre depende de al menos una de la información de velocidad y la información de posición;

10 determinar (615) un primer valor de ganancia de bucle de control y un segundo valor de ganancia de bucle de control utilizando la frecuencia de la torre; y
generar (625), utilizando el primer valor de ganancia de bucle de control y el segundo valor de ganancia de bucle de control, una o más señales de control para controlar una celeridad de giro de un rotor de la turbina eólica, la una o más señales de control comprenden:

15 generar una señal de referencia de paso para controlar el paso de una o más palas del rotor de la turbina eólica, en donde generar la señal de referencia de paso comprende aplicar el primer valor de ganancia de bucle de control a la información de velocidad y aplicar el segundo valor de ganancia de bucle de control a la información de posición.

20 2. El método de la reivindicación 1, que comprende, además:

en respuesta a la determinación de que la frecuencia de la torre es menor que una primera frecuencia de umbral, desactivar o desajustar un primer bucle de control asociado con el primer valor de ganancia de bucle de control.

25 3. El método de las reivindicaciones 1 o 2, que comprende, además:

en respuesta a la determinación de que la frecuencia de la torre es mayor que una segunda frecuencia umbral, desactivar o desajustar un segundo bucle de control asociado con el segundo valor de ganancia de bucle de control.

30 4. El método de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde generar la señal de referencia de paso comprende:

35 generar una primera señal de referencia de paso correspondiente a una producción de energía ordenada de la turbina eólica;
generar una señal de compensación de referencia de paso utilizando la información de estado dinámico; y
añadir la señal de compensación de referencia de paso a la primera señal de referencia de paso para generar la señal de referencia de paso.

40 5. Un controlador (205) para una turbina eólica (100), comprendiendo el controlador:

uno o más procesadores informáticos; y
una memoria que comprende un código legible por ordenador que, cuando se ejecuta utilizando el uno o más procesadores informáticos, realiza una operación que comprende:

45 determinar, utilizando una o más señales de sensor (250), la información de estado dinámico (240) para una torre de una turbina eólica durante la producción de energía, en donde la información de estado dinámico comprende determinar la información de velocidad y la información de posición correspondiente a una ubicación de referencia de la torre y a una frecuencia de la torre, la frecuencia de la torre depende de al menos una de la información de velocidad y la información de posición;

50 determinar un primer valor de ganancia de bucle de control (325) y un segundo valor de ganancia de bucle de control (330) utilizando la frecuencia de la torre; y
generar, utilizando el primer valor de ganancia de bucle de control y el segundo valor de ganancia de bucle de control, una o más señales de control (270) para controlar una celeridad de giro de un rotor de la turbina eólica, la una o más señales de control comprenden:

55 generar una señal de referencia de paso para controlar el paso de una o más palas del rotor de la turbina eólica, en donde generar la señal de referencia de paso comprende aplicar el primer valor de ganancia de bucle de control a la información de velocidad y aplicar el segundo valor de ganancia de bucle de control a la información de posición.

60 6. El controlador de la reivindicación 5, que comprende, además:

en respuesta a la determinación de que la frecuencia de la torre es menor que una primera frecuencia de umbral, desactivar o desajustar un primer bucle de control asociado con el primer valor de ganancia de bucle de control.

65 7. El controlador de las reivindicaciones 5 o 6, que comprende, además:

en respuesta a la determinación de que la frecuencia de la torre es mayor que una segunda frecuencia umbral, desactivar o desajustar un segundo bucle de control asociado con el segundo valor de ganancia de bucle de control.

5 8. El controlador de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde generar la señal de referencia de paso comprende:

10 generar una primera señal de referencia de paso correspondiente a una producción de energía ordenada de la turbina eólica;
generar una señal de compensación de referencia de paso utilizando la información de estado dinámico; y
añadir la señal de compensación de referencia de paso a la primera señal de referencia de paso para generar la señal de referencia de paso.

15 9. Una turbina eólica (100) que comprende:

una torre (102);
un rotor (103);
20 uno o más sensores (250) configurados para generar una o más señales de sensor; y el controlador (205) de acuerdo con la reivindicación 5.

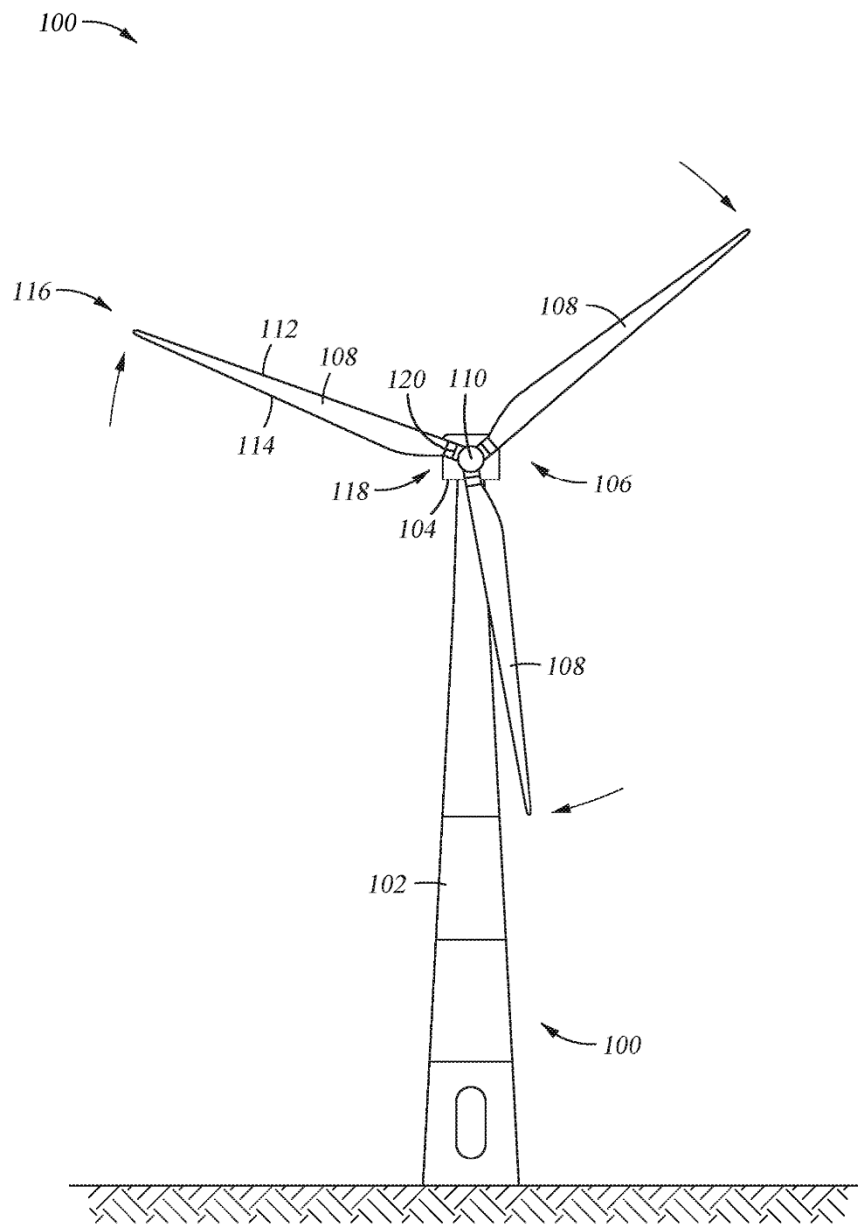


Fig. 1

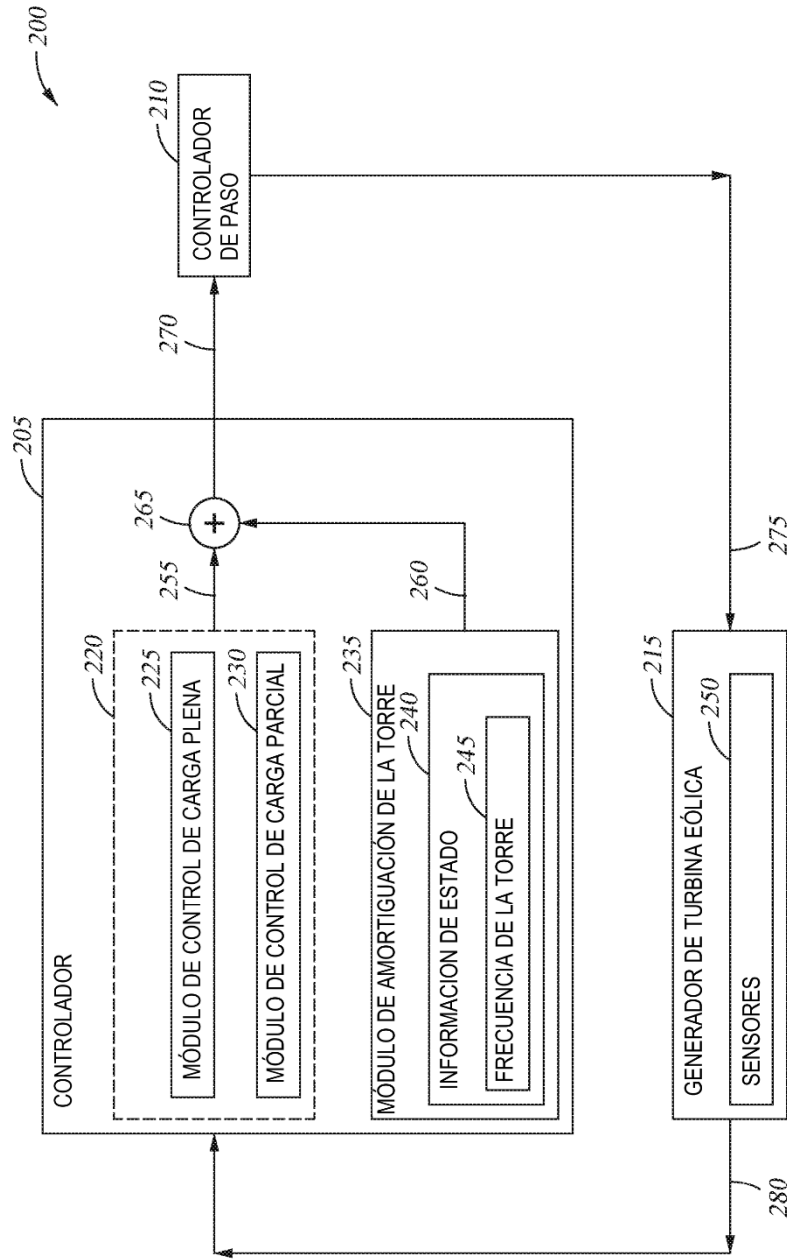


Fig. 2

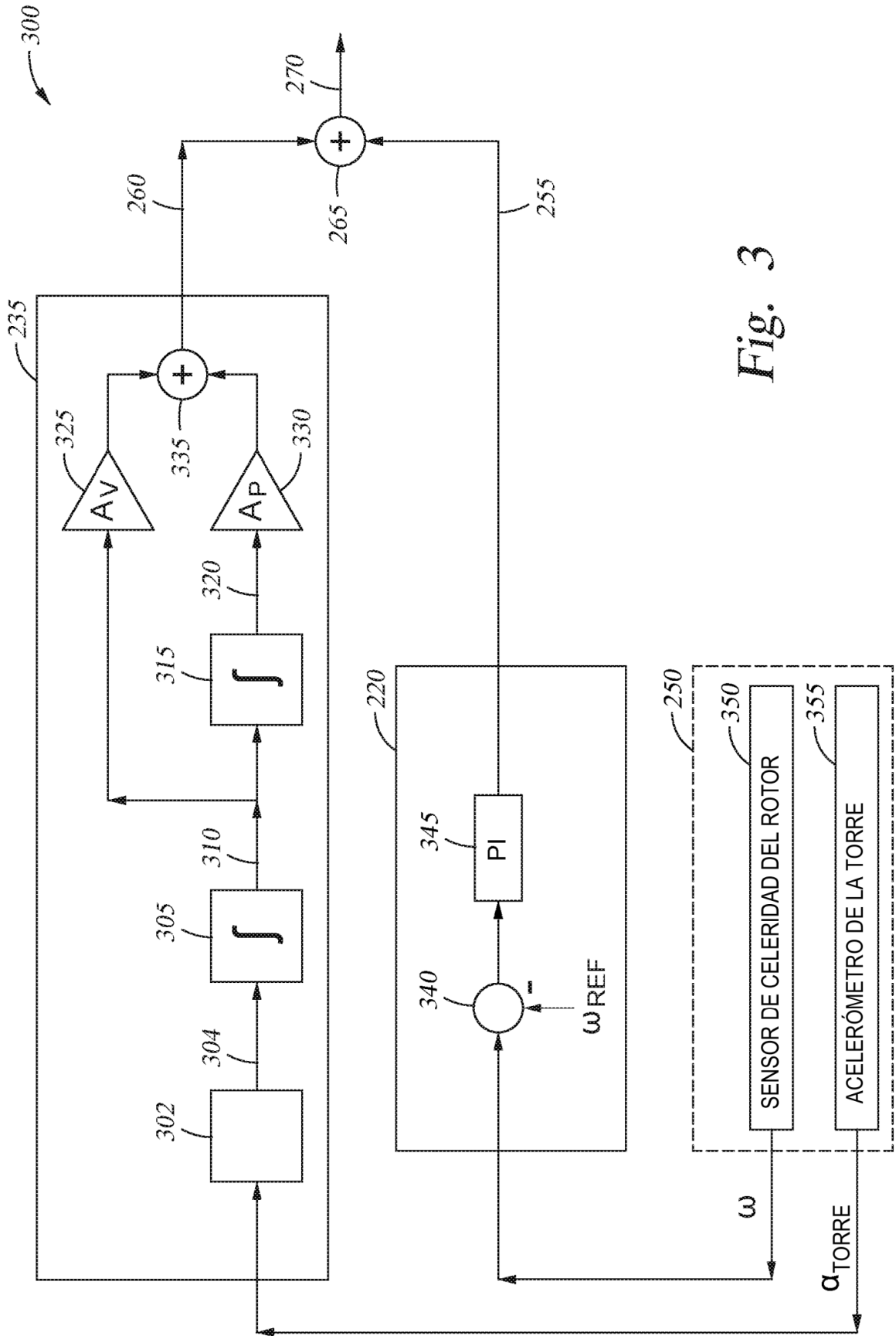
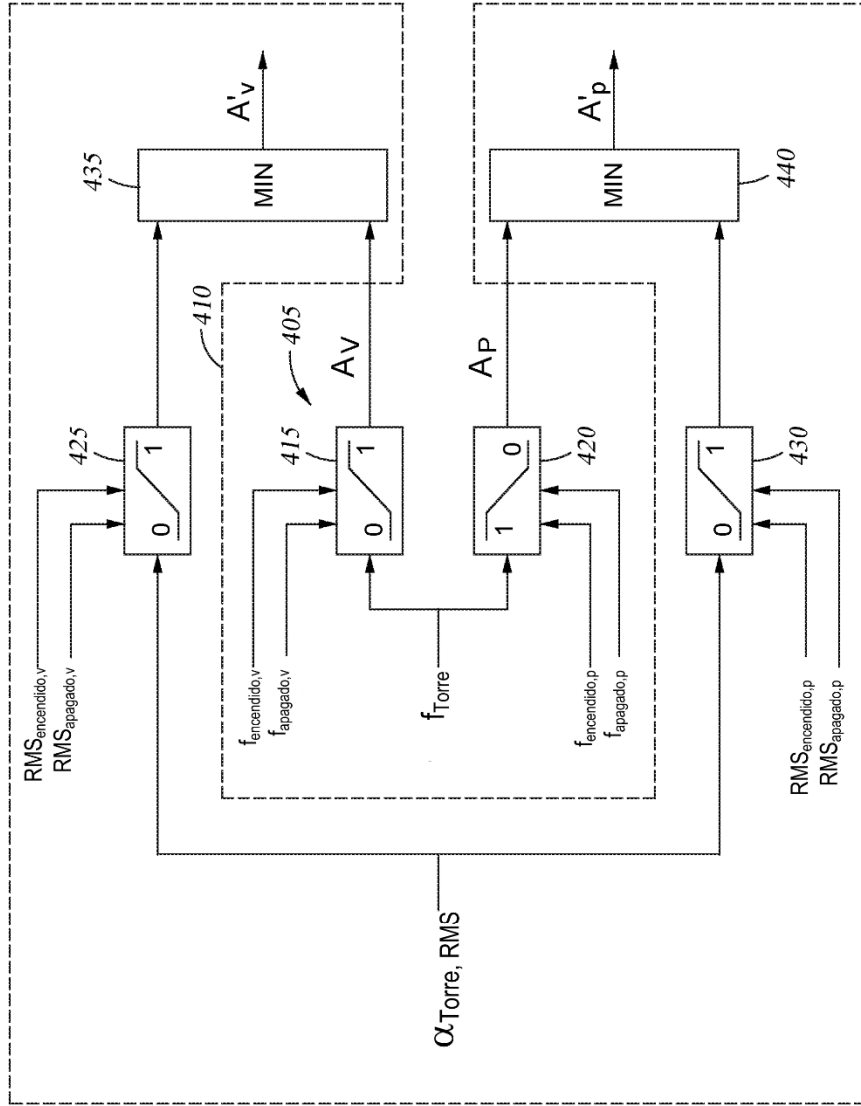


Fig. 3



400

Fig. 4

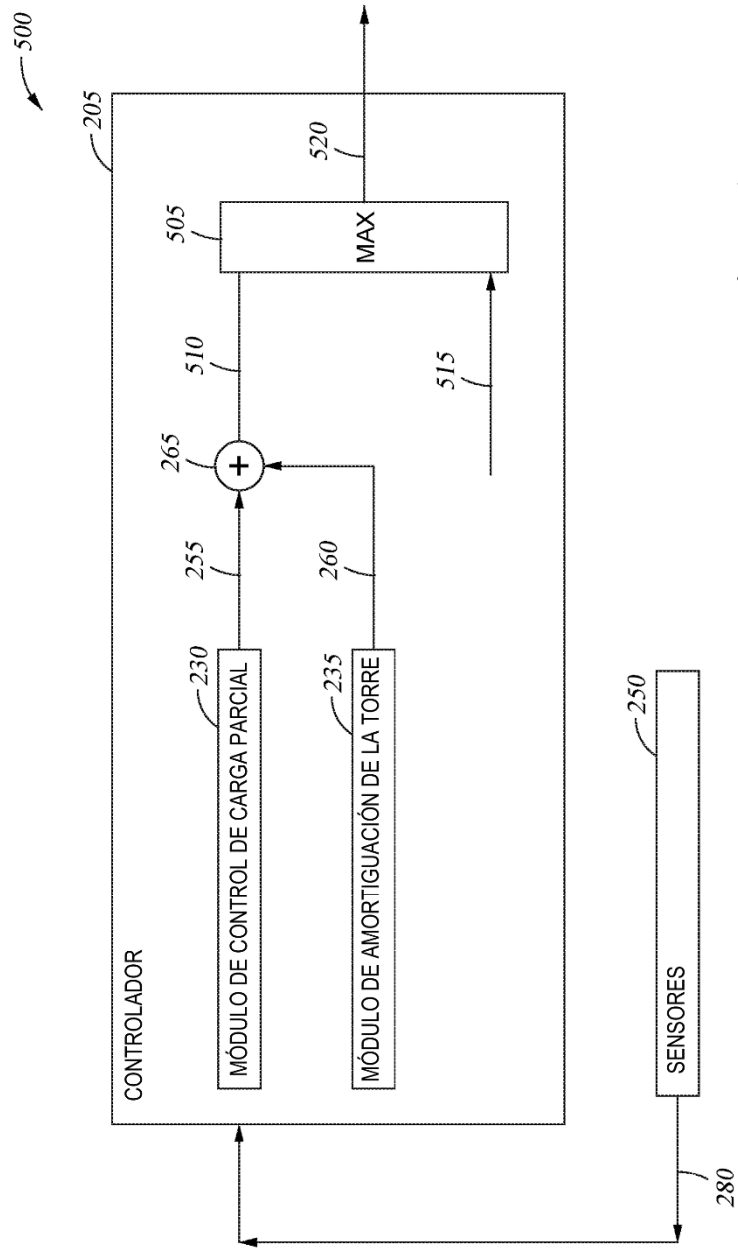


Fig. 5

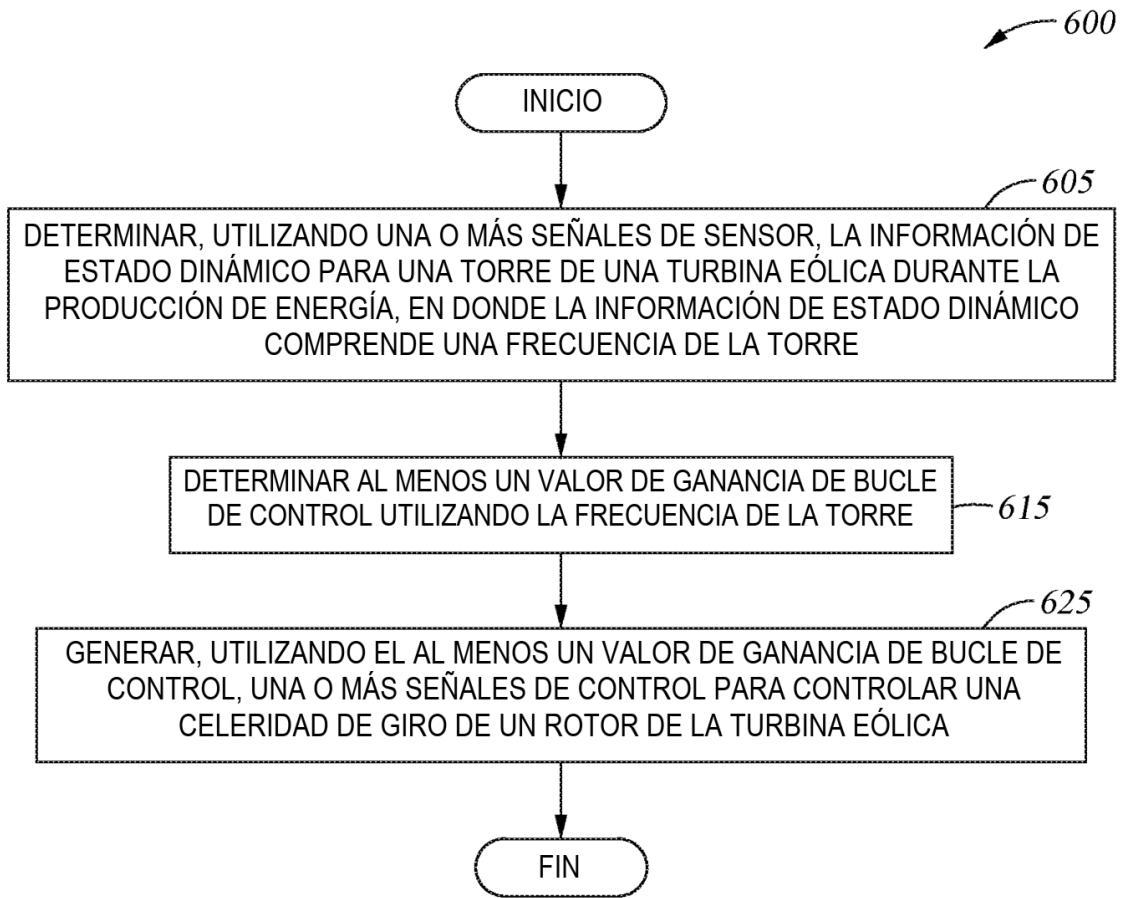


Fig. 6

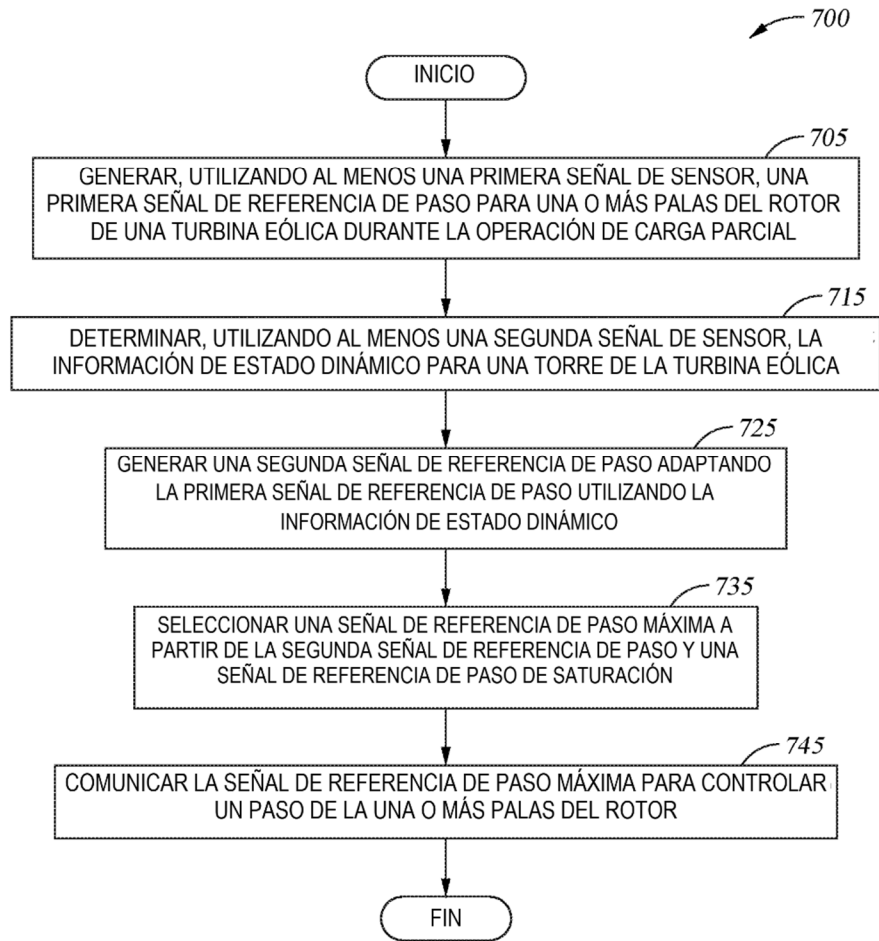


Fig. 7