

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 922 170**

51 Int. Cl.:

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.11.2018** **PCT/DK2018/050282**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.05.2019** **WO19086092**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.11.2018** **E 18800035 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.07.2022** **EP 3707375**

54 Título: **Método y sistema para controlar una turbina eólica para gestionar vibraciones de pala en sentido del borde**

30 Prioridad:

06.11.2017 DK PA201770829

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

09.09.2022

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)

Hedeager 42

8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

BACHMANN, THOMAS HEDEGAARD y

NIELSEN, ANDERS STEEN

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 922 170 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

Método y sistema para controlar una turbina eólica para gestionar vibraciones de pala en sentido del borde

5 **Campo técnico**

Los aspectos de la invención se refieren a un método y un sistema para controlar una turbina eólica y, más especialmente, para identificar y mitigar vibraciones inaceptables en las palas de la turbina eólica.

10 **Antecedentes**

Las turbinas eólicas están diseñadas para operar de manera fiable y segura bajo una amplia gama de condiciones de viento. Sin embargo, a pesar de las prácticas de diseño cuidadosas, algunas condiciones operativas pueden resultar en oscilaciones de los componentes de la turbina eólica, especialmente las palas. Tales oscilaciones pueden comprometer la operación fiable de la turbina eólica, y este es especialmente el caso si la frecuencia de las oscilaciones coincide con las frecuencias de resonancia de los componentes de la turbina eólica.

Una fuente de oscilación es la vibración de las palas de la turbina eólica en sentido del borde (*edgewise*). Las vibraciones en sentido del borde en ciertas amplitudes pueden provocar daños a las palas, pero también a otros componentes de la turbina eólica.

Se sabe reforzar y endurecer las palas con fibras de carbono con el fin de modificar las frecuencias estructurales de las palas para evitar vibraciones en sentido del borde resonantes a determinadas frecuencias. Sin embargo, este enfoque aumenta significativamente el coste total de fabricación de las palas.

La presente invención pretende abordar al menos algunos de los problemas mencionados anteriormente. Los documentos WO 2017/092773 A1 y EP 2 798 200 B1 dan ejemplos del estado de la técnica.

30 **Sumario de la invención**

De acuerdo con un primer aspecto de la invención, se proporciona un método para controlar una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1 para evitar vibraciones en sentido del borde, comprendiendo el método las etapas de determinar una frecuencia de modo de vórtice de una pala de rotor de la turbina eólica; determinar una zona de evitación basada en la frecuencia de modo de vórtice, siendo la zona de evitación un intervalo de velocidad de rotor; y, recibir un punto de ajuste de velocidad de rotor, en donde el método comprende además las etapas de: ajustar la velocidad de rotor a un valor fuera del intervalo de velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor está dentro del intervalo de velocidad de rotor; o, ajustar la velocidad de rotor a un valor correspondiente al punto de ajuste de velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor está fuera del intervalo de velocidad de rotor. Debido a que el intervalo de velocidad de rotor corresponde a la zona de evitación, esto significa que las velocidades de rotor que se encuentran dentro de la zona de evitación se evitan cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor está dentro del intervalo de velocidad de rotor, evitando de este modo la excitación de vibraciones de pala en sentido del borde no deseadas.

Preferentemente, las etapas de controlar y ajustar la velocidad de rotor comprenden además las etapas de mantener la velocidad de rotor en un valor igual a o por debajo de una velocidad de rotor correspondiente a un umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor recibido está dentro del intervalo de velocidad de rotor; y, aumentar la velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o supera un umbral superior del intervalo de velocidad de rotor; o, mantener la velocidad de rotor en un valor igual a o por encima de una velocidad de rotor correspondiente a un umbral superior del intervalo de velocidad de rotor cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor esté dentro del intervalo de velocidad de rotor; y, disminuir la velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o cae por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor. La velocidad de rotor aumenta o disminuye a través del intervalo de velocidad de rotor tan rápido como sea prácticamente posible sin someter los sistemas mecánicos y eléctricos a cargas dinámicas altas potencialmente dañinas.

Preferentemente, la frecuencia de modo de vórtice determinada es uno o más de un modo de vórtice hacia delante y un modo de vórtice hacia atrás. Es especialmente ventajoso poder determinar la frecuencia de modo de vórtice hacia delante y hacia atrás de manera independiente, así como simultáneamente, ya que esto proporciona flexibilidad de control y permite adaptar la determinación de acuerdo con las condiciones del viento.

La frecuencia de modo de vórtice se determina en función de una frecuencia de rotor medida y una frecuencia de vibración en sentido del borde predeterminada de la pala de rotor.

Preferentemente, el método comprende además las etapas de medir una señal indicativa del movimiento de la pala de rotor de la turbina eólica; determinar un espectro de frecuencia de la señal medida en las proximidades de la frecuencia de modo de vórtice determinada; obtener una frecuencia central a partir del espectro de frecuencias; y, ajustar la frecuencia de modo de vórtice determinada con respecto a la frecuencia central. Este proceso identifica el

contenido de frecuencia en el movimiento de la pala de rotor que puede considerarse atribuible a la vibración en sentido del borde y, a continuación, calibra la frecuencia de modo de vórtice determinada para garantizar su precisión.

Preferentemente, la frecuencia de modo de vórtice determinada se ajusta para igualar la frecuencia central.

Preferentemente, la señal es indicativa de una vibración en sentido del borde de la pala de rotor.

Preferentemente, la señal es una señal de aceleración indicativa del movimiento de la parte superior de la torre de la turbina eólica.

Preferentemente, se calculan un umbral inferior y un umbral superior de la zona de evitación cada uno como un porcentaje de la frecuencia de modo de vórtice determinada.

Preferentemente, el método comprende además la etapa de aumentar o disminuir la anchura de la zona de evitación. Reducir la anchura de la zona de evitación mejora el rendimiento energético de la turbina eólica. Sin embargo, si se experimentan vibraciones excesivas en los umbrales de la zona de evitación, dando lugar a altas cargas dinámicas potencialmente dañinas, aumentar la anchura de la zona de evitación evitará estas vibraciones.

Preferentemente, un valor central de la zona de evitación es la frecuencia de modo de vórtice determinada.

Preferentemente, la etapa de aumentar la velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o supera el umbral superior del intervalo de velocidad de rotor se produce cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o supera el umbral superior del intervalo de velocidad de rotor durante un período predeterminado, y la etapa de disminuir la velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor es igual o cae por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor se produce cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor es igual o cae por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor durante un período predeterminado. Un beneficio de esto es reducir la probabilidad de implementar una acción de control sobre la base de condiciones de viento transitorias o anómalas.

Preferentemente, la velocidad de rotor dentro del intervalo de velocidad de rotor es una función no lineal de la velocidad del viento.

Preferentemente, la velocidad de rotor aumenta o disminuye de manera no lineal con respecto a la velocidad del viento.

De acuerdo con un segundo aspecto de la invención, se proporciona un controlador para un sistema de control de turbinas eólicas que comprende un procesador y un módulo de memoria, en donde el módulo de memoria comprende un conjunto de instrucciones de código de programa que, cuando son ejecutadas por el procesador, implementan un método de acuerdo con el primer aspecto de la invención.

De acuerdo con un tercer aspecto de la invención, se proporciona una turbina eólica que comprende el controlador de acuerdo con el segundo aspecto de la invención.

De acuerdo con un cuarto aspecto de la invención, se proporciona un producto de programa informático descargable desde una red de comunicación y/o almacenado en un medio legible por máquina que comprende unas instrucciones de código de programa para implementar un método de acuerdo con el primer aspecto de la invención.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán los aspectos anteriores y otros de la invención, únicamente a modo de ejemplo, haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una vista esquemática de una turbina eólica de acuerdo con una realización de la presente invención;

la figura 2 es una vista esquemática de los sistemas de la turbina eólica de la figura 1;

la figura 3 es una vista detallada esquemática de los sistemas de un sistema de monitorización y control del sistema de turbina eólica de la figura 2;

la figura 4 es un diagrama que ilustra una sección transversal esquemática de una pala de rotor de turbina eólica;

la figura 5 es una vista lateral de la pala de rotor de turbina eólica de la figura 4;

la figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso mediante el que pueden calcularse las frecuencias de modo de vórtice hacia delante y hacia atrás de la turbina eólica de la figura 1;

la figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso adicional mediante el que pueden calcularse las

frecuencias de modo de vórtice hacia delante y hacia atrás de la turbina eólica de la figura 1;

la figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra un proceso para controlar la turbina eólica de la figura 1; y,

5 la figura 9 muestra unas gráficas que ilustran la diferencia en el proceso para controlar la turbina eólica de la figura 1.

En los dibujos, las características similares se indican con números de referencia similares.

10 Descripción

La figura 1 muestra una turbina eólica 10 que comprende una torre 12 que soporta una góndola 14 en la que se monta un rotor 16. El rotor 16 comprende una pluralidad de palas de turbina eólica 18, en donde cada pala 18 de la pluralidad de palas de turbina eólica 18 se extiende radialmente desde un buje central 20. En este ejemplo, el rotor 16 comprende tres palas 18, aunque será evidente para los expertos en la materia que son posibles otras configuraciones.

Haciendo referencia también a la figura 2, que es una ilustración esquemática de la turbina eólica 10 a un nivel de sistemas, la turbina eólica 10 comprende además una caja de cambios 22 y un sistema de generación de potencia 24 que incluye un generador 26 y un sistema convertidor de potencia 28. Como se sabe, la caja de cambios 22 aumenta la velocidad de rotación del rotor 16 y acciona el generador 26, que a su vez envía la potencia generada a un sistema de convertidor 28. Por lo general, un sistema de este tipo estará basado en potencia eléctrica trifásica, aunque no es esencial. Se conocen otros diseños de turbina eólicas, tales como los tipos "sin engranajes", también conocidos como "transmisión directa", así como los tipos de transmisión de "transmisión por correa".

25 El generador 26 y el sistema convertidor 28 pueden basarse, como ejemplos, en una arquitectura de convertidor de escala completa (FSC) o en una arquitectura de generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), aunque el experto en la materia conoce otras arquitecturas.

30 En la realización ilustrada, la salida de potencia del sistema de convertidor 28 de la turbina eólica 10 se transmite a una carga, que se muestra en el presente documento como la red eléctrica 30. El experto en la materia sabrá que existen diferentes opciones de conversión y transmisión de potencia.

La turbina eólica 10 comprende además un medio de control 32 que puede operarse para monitorizar la operación de la turbina eólica 10 y para emitir comandos a la misma para lograr un conjunto de objetivos de control. El medio de control 32 se muestra en la figura 2 como una visión general, simplificada y esquemática de una pluralidad de unidades de control y módulos, y también en la figura 3, como un ejemplo más detallado de cómo pueden disponerse unidades y módulos específicos con el fin de facilitar el intercambio de datos entre los mismos.

40 El medio de control 32 comprende un procesador 34 configurado para ejecutar instrucciones que se almacenan y se leen en un módulo de memoria 36 y/o un almacén de datos exterior que forma parte de una red exterior 38. Los datos de medición también pueden almacenarse en el módulo de memoria 36 y recuperarse con el fin de ejecutar procesos de acuerdo con las instrucciones que realiza el procesador 34.

45 También pueden recibirse instrucciones y datos de controladores o sensores exteriores que forman parte de la red exterior 38, y pueden emitirse alertas y/o datos registrados a través de la red exterior 38 para almacenarlos/mostrarlos en una fuente exterior para su análisis y monitorización remotos.

Además, el procesador 34 está en comunicación con una pluralidad de sensores 40 que están dispuestos dentro de la turbina eólica 10. Por ejemplo, como se muestra en la figura 3, la pluralidad de sensores 40 puede comprender un acelerómetro de torre 42, un sensor de velocidad de rotor 44, un sensor de ángulo de paso de pala 46, un sensor de ángulo de guiñada de góndola 48 y un sensor de velocidad de viento 49.

El medio de control 32 de la turbina eólica 10 también incluye al menos una unidad de control 50.

55 En la configuración mostrada en la figura 3, se incluyen tres unidades de control 50. Estas son (i) una unidad de control de ángulo de paso de pala 52 para alterar el ángulo de paso de pala de las palas de rotor 18; (ii) una unidad de control de ángulo de guiñada de góndola 54 para modificar el ángulo de guiñada de la góndola 14; y, (iii) una unidad de control de velocidad 56 que se usa para alterar la velocidad de rotor de la turbina eólica 10 usando un freno, por ejemplo. En una realización alternativa, el medio de control 32 incluye un controlador de producción (no mostrado), que controla la velocidad de rotor de la turbina eólica 10 a través del control de convertidor y el control de paso, en función de la configuración de control específica, eliminando de este modo la necesidad de una unidad de control de velocidad especializada 56.

65 Debería apreciarse que la turbina eólica 10 incluiría más unidades de control 50, y que la figura 3 se proporciona solo para ilustrar un ejemplo de una arquitectura de sistema en la que puede implementarse la invención.

Una función principal del medio de control 32 es controlar la generación de potencia de la turbina eólica 10 de tal manera que optimice la producción de energía bajo las condiciones del viento en ese momento y de acuerdo con la generación de potencia demandada por un operario de la red de transmisión. Sin embargo, además de sus principales tareas de control de potencia, el medio de control 32 pueden operarse para realizar un conjunto de funciones y soluciones de monitorización de seguridad y diagnóstico. En las realizaciones de la invención, una de estas funciones es evaluar las condiciones que dan lugar a las vibraciones de pala en sentido del borde inaceptables y controlar la turbina eólica 10 en consecuencia. La identificación de las vibraciones de pala en sentido del borde es importante, ya que puede ayudar a evitar daños a la turbina eólica 10 debidos a la oscilación no deseada del rotor 16 durante la operación. De manera adicional, debería realizarse una monitorización para garantizar que no se alcancen niveles peligrosos de vibración.

Las vibraciones de pala en sentido del borde de rotor se producen a lo largo de la longitud de la pala en sentido del borde, que es una de las dos direcciones principales en las que la pala vibra y oscila principalmente. La otra dirección principal de oscilación es en un sentido del batimiento (*flapwise*). Haciendo referencia a las figuras 4 y 5, cuando se contempla una pala de rotor 18 que tiene una sección de pala exterior 60, indicada por líneas de puntos en la figura 4, y una raíz de pala circular 62, que tiene una circunferencia, las oscilaciones en sentido del borde provocan que la pala 18 se mueva a lo largo de un eje en sentido del borde 64 que se extiende en general a través de los bordes de ataque y fuga 66, 68 de la pala 18. Por lo tanto, el eje en sentido del borde 64 es sustancialmente perpendicular al eje longitudinal 69 de la pala 18. De manera similar, las oscilaciones en sentido del batimiento provocan que la pala se mueva con respecto a un eje en sentido del batimiento 70 que se extiende a través de las superficies superior e inferior 72, 74 de la pala 18 y es sustancialmente perpendicular tanto al eje longitudinal 69 como al eje en sentido del borde 64 de la pala 18. Una pala puede oscilar tanto en sentido del batimiento como en sentido del borde.

Cuando el rotor 16 está girando, las oscilaciones de las palas 18 a lo largo de sus ejes en sentido del borde pueden provocar el movimiento de la pala 18 en el mismo plano que el plano de rotación del rotor 16. Ya que la oscilación en sentido del borde de las palas 18 excita el rotor 16 con una fuerza que es transversal a su eje longitudinal, en condiciones de resonancia, esto puede dar como resultado que el eje de rotación del árbol de rotor describa un patrón de movimiento errático. Este fenómeno se conoce como "vórtice".

El patrón aparentemente complejo de movimiento del rotor 16 es el resultado de dos vectores de fuerza de rotación de manera circular que se generan por el comportamiento oscilatorio combinado de las palas. Un primer vector de fuerza rota en el mismo sentido de rotación que el rotor 16 pero a una mayor frecuencia (vector de fuerza progresiva) y un segundo vector de fuerza que rota en un sentido opuesto al del rotor y a una frecuencia más baja (vector de fuerza regresiva). El resultado de los vectores de fuerza progresiva y regresiva es un vector de fuerza que traza una trayectoria elíptica cuando se observa en un marco de referencia rotatorio alineado con el rotor 16.

La diferencia de fase entre las oscilaciones en sentido del borde de pala determina si el vórtice se produce en el mismo sentido que la rotación del rotor, lo que en general se conoce como vórtice hacia delante o "modo de vórtice hacia delante", o si el vórtice se produce en una dirección opuesta a la rotación del rotor, que en general se conoce como vórtice hacia atrás o "modo de vórtice hacia atrás".

Como se apreciará, la rotación del árbol de rotor imparte fuerzas laterales a la góndola 14 a través del rotor 16 y, por lo tanto, provoca que se balancee de lado a lado. Este movimiento puede detectarse monitorizando el comportamiento de la góndola 14 o la parte superior de la torre 12, y el movimiento a una frecuencia de vórtice por encima de cierto nivel puede considerarse indicativo de que las palas 18 oscilan inaceptablemente en sentido del borde. Es este movimiento el que los inventores han apreciado que puede usarse para identificar las vibraciones de pala en sentido del borde y para emprender acciones atenuantes.

Las figuras 6 a 8 son unos diagramas de flujo de unos procesos de acuerdo con las realizaciones de la invención. Las figuras 6 y 7 muestran ambas unos diagramas de flujo de los procesos 100, 200 mediante los que puede calcularse la frecuencia de los modos de vórtice hacia delante y hacia atrás. La figura 8 es un diagrama de flujo de un proceso 300 para controlar una turbina eólica 10 que se basa en la identificación de las frecuencias de modo de vórtice. Estos procesos pueden implementarse usando las arquitecturas de sistema explicadas en las figuras 2 y 3.

El proceso 100 de la figura 6 se inicia en la etapa 102, y en la segunda etapa 104, se mide la velocidad de rotor con el sensor de velocidad de rotor 44. Se crea una serie temporal de la velocidad de rotor medida durante un período de medición predeterminado por el sensor 44 y, en la siguiente etapa del proceso 106, se aplica un filtro paso bajo a la medición de la serie temporal de la velocidad de rotor. Al aplicar un filtro paso bajo, se obtiene una señal de velocidad de rotor promedio.

A partir de la velocidad de rotor promedio, se calcula una frecuencia de rotación 108. El proceso pasa a la siguiente etapa 110, donde, usando un valor de frecuencia en sentido del borde predeterminado 112 y la frecuencia de rotación 108, pueden mapearse las frecuencias de modo de vórtice 110. La frecuencia en sentido del borde 112 es la frecuencia a la que las palas de rotor 18 vibran en sentido del borde, y es un parámetro conocido de las palas de rotor 18 que se almacena y recupera del módulo de memoria 36. El valor de frecuencia en sentido del borde 112 puede calcularse usando una serie de técnicas, por ejemplo, puede calcularse basándose en los modelos estructurales del tipo de pala

específico usado en la turbina eólica o puede determinarse sometiendo ese tipo de pala específico a un procedimiento de prueba diseñado para identificar la frecuencia en sentido del borde natural (frecuencia propia) de la pala.

5 En una realización, se prevé que el mapeo 110 de la frecuencia en sentido del borde a las frecuencias de modo de vórtice hacia delante y hacia atrás sea una resta y suma de las dos frecuencias componentes, es decir, la frecuencia de modo de vórtice hacia atrás se calcula restando la frecuencia de rotación 108 de la frecuencia en sentido del borde 112, y la frecuencia de modo de vórtice hacia delante se calcula sumando la frecuencia de rotación 108 y la frecuencia en sentido del borde 112. También se prevé el mapeo de los modos de orden superior.

10 Después de la etapa de mapeo 110, se obtienen las frecuencias de modo de vórtice, que corresponden a un modo de vórtice hacia delante y un modo de vórtice hacia atrás. A continuación, estas frecuencias de modo de vórtice se almacenan 114, 116 en el módulo de memoria 36 para su uso posterior antes de que el proceso termine en la etapa 118. Se prevé que el proceso se repita continuamente para volver a calcular las frecuencias de modo de vórtice para garantizar que sean precisas. Los expertos en la materia apreciarán que las diversas frecuencias de modo de vórtice de la turbina eólica 10 también podrían determinarse durante el diseño de la pala 18 y/o el modelado del rotor 16.

Una vez calculadas las frecuencias de modo de vórtice, puede usarse un proceso adicional 200, como se ilustra en la figura 7, para calibrar las frecuencias de modo de vórtice determinadas, tal y como se describirá a continuación.

20 El proceso 200 se inicia en la etapa 202, que puede ser cuando la turbina eólica 10 se ha puesto en marcha pero antes de alcanzar un estado de generación de potencia o durante un estado de producción.

25 Inicialmente, el proceso 200 sigue por dos ramas de forma simultánea. En una primera rama 204, se recibe una frecuencia de modo de vórtice 206. La frecuencia de modo de vórtice se calcula de acuerdo con el proceso 100 mostrado en la figura 6, y se recupera del módulo de memoria 36 con el procesador 34. En otra realización de la invención, la frecuencia de modo de vórtice puede ser un parámetro almacenado dentro del módulo de memoria 36 que se ha calculado o predeterminado de alguna otra manera, por ejemplo, determinado durante el diseño de la pala y el modelado del sistema de rotor.

30 Se apreciará que ambas frecuencias de modo de vórtice calculadas usando el proceso 100 o determinadas de otro modo pueden usarse en el proceso 200 implementando dos de los procesos 200 simultáneamente. Sin embargo, para facilitar la comprensión, la siguiente exposición se basará en el análisis de datos relacionados con una sola frecuencia de modo de vórtice.

35 Al haber recibido la frecuencia de modo de vórtice, el procesador 34 implementa, en la etapa 208, un filtro paso banda que tiene una frecuencia central ajustada igual a la frecuencia de modo de vórtice. Un ancho de banda para el filtro puede ser un ancho de banda establecido para cada frecuencia de modo de vórtice, o puede variar de acuerdo con la frecuencia y/o la velocidad del rotor. Está previsto, sin embargo, que el ancho de banda del filtro estuviera en el intervalo de 0,1 Hz a 0,5 Hz, aunque es posible que se puedan usar anchos de banda más pequeños o más grandes en función del resultado previsto.

45 En una segunda desviación inicial 210 del proceso 200, en la etapa 212, se mide una señal indicativa del movimiento vibratorio de las palas 18 en sentido del borde. La señal puede incluir una componente de aceleración de la torre en una dirección paralela al plano de rotor, es decir, transversal a un eje longitudinal de la góndola. La aceleración de la torre se mide mediante un sensor, tal como el acelerómetro 42, montado dentro de la góndola 14 o localizado hacia la parte superior de la torre 12. El procesador 34 recibe una serie temporal de medición de aceleración durante un período de tiempo respectivo. El período durante el que se realizan las mediciones puede variar de acuerdo con la velocidad de rotor 16 o puede establecerse en un único valor. El acelerómetro realiza mediciones continuamente usando una serie de ventanas de muestreo superpuestas, también conocido como "promedio móvil" u otros métodos. Una duración típica de ventana sería entre 1 y 5 segundos, con una frecuencia de muestreo de al menos 10 Hz. Los expertos en la materia apreciarán que pueden usarse otras técnicas de cálculo de promedios, tal como una técnica de promedios exponencial.

50 Como alternativa, la señal medida en la etapa 212 podría obtenerse a partir de un sensor (no mostrado) adecuado para medir el movimiento vibratorio de las palas 18 en sentido del borde, tal como un sensor óptico, un acelerómetro o un sensor giroscópico, colocado en la raíz de cada una de las palas 18 o en otras posiciones de las palas 18.

60 A continuación, se filtra la señal medida en la etapa 212, en la etapa 214, usando el filtro paso banda. Algunas vibraciones operativas y otros contenidos de frecuencia se filtran mediante el filtro paso banda, dejando una señal que se compone sustancialmente de vibración en la región de la frecuencia de modo de vórtice que provocan por las vibraciones de las palas 18 en sentido del borde. De este modo, el proceso determina, obtiene o calcula un espectro de frecuencia en el dominio del tiempo del movimiento vibratorio medido de las palas 18 en sentido del borde en la proximidad de la frecuencia de modo de vórtice determinada. En efecto, este proceso reduce el alcance de la aceleración medida u otras señales que indican el movimiento vibratorio de las palas 18 en sentido del borde para considerar solo la región de la frecuencia de modo de vórtice.

En la etapa 216, se determina una frecuencia central a partir del espectro de frecuencia obtenido en la etapa 214 como la componente de frecuencia con el pico más grande en el espectro de frecuencia o con la densidad espectral de potencia más alta.

- 5 A continuación, se compara la señal de frecuencia central, en la etapa 218, con la frecuencia de modo de vórtice obtenida del proceso 100 o determinada de otro modo.

Si la frecuencia central es la misma que la frecuencia de modo de vórtice determinada, el proceso 200 avanza a la etapa 224, donde termina el proceso 200. Sin embargo, si la frecuencia central difiere de la frecuencia de modo de vórtice determinada, el proceso 200 avanza a la etapa 222, donde se ajusta la frecuencia de modo de vórtice determinada, por ejemplo, con el fin de que sea igual a la frecuencia central. A continuación, el proceso 200 avanza a la etapa 223 donde la frecuencia de modo de vórtice ajustada se almacena en el módulo de memoria 36 para su uso posterior, antes de que el proceso 200 termine en la etapa 224. Se prevé que el proceso 200 podría repetirse continuamente para ajustar la frecuencia de modo de vórtice determinada para garantizar que sea precisa.

15 Una vez que se ha determinado la frecuencia de modo de vórtice usando el proceso 100 y/o el proceso 200, se usa un proceso adicional 300, como se ilustra en la figura 8, para decidir cómo debería controlarse la turbina eólica 10 en vista de la frecuencia de modo de vórtice determinada.

20 El proceso 300 se inicia en la etapa 302, que puede ser cualquier momento durante el que la turbina eólica 10 está operando, y en la segunda etapa 304, la frecuencia de modo de vórtice se recibe después de que el procesador 34 la haya recuperado del módulo de memoria 36. A continuación, se calcula una zona de evitación en la siguiente etapa 306 del proceso 300 basándose en la frecuencia de modo de vórtice recibida en la etapa 304. La zona de evitación es esencialmente un amortiguador que se extiende a ambos lados de la frecuencia de modo de vórtice determinada y define un intervalo de velocidad de rotor que podría dar lugar a vibraciones de las palas 18 no deseadas en sentido del borde. La zona de evitación puede calcularse como un porcentaje de la frecuencia de modo de vórtice determinada, definiendo un umbral inferior y un umbral superior de la zona de evitación. Por ejemplo, si la frecuencia de modo de vórtice determinada es de 2 Hz, un umbral más bajo de la zona de evitación, calculado como el 10 % de la frecuencia de modo de vórtice determinada, sería de 1,8 Hz, mientras que un umbral superior sería de 2,2 Hz. En este ejemplo, la anchura de la zona de evitación es de 0,4 Hz. Sin embargo, si no se miden vibraciones significativas en los umbrales de la zona de evitación, la anchura de la zona de evitación puede reducirse posteriormente. Por el contrario, la anchura de la zona de evitación puede aumentarse si se experimentan vibraciones excesivas en los umbrales de la zona de evitación. La anchura de la zona de evitación también puede ajustarse de acuerdo con la carga operativa de la turbina eólica. En el ejemplo anterior, la frecuencia de modo de vórtice determinada es el valor central de la zona de evitación. Sin embargo, los expertos en la materia apreciarán las ventajas de tener un umbral de la zona de evitación más compensado a partir de la frecuencia de modo de vórtice determinada que el otro umbral. De este modo, la zona de evitación se distribuiría asimétricamente alrededor de la frecuencia de modo de vórtice determinada.

En la etapa 308, se determina un intervalo de velocidad de rotor correspondiente a la zona de evitación.

40 En la quinta etapa 312, se determina un punto de ajuste de velocidad de rotor en función de la velocidad del viento, que puede estimarse o medirse directamente con el sensor de velocidad de viento 49. Si se mide la velocidad del viento, se crea una serie temporal de la velocidad del viento medida durante un período de medición predeterminado por el sensor 49. El período durante el que se realizan las mediciones puede variar de acuerdo con, por ejemplo, la estación astronómica o puede establecerse en un único período. El sensor 49 puede realizar mediciones de forma continua usando una serie de ventanas de muestreo superpuestas, lo que resulta en un "promedio móvil". Sin embargo, los expertos en la materia apreciarán que pueden usarse otras técnicas para promediar, tal como una técnica de promedio exponencial.

50 A continuación, se compara el punto de ajuste de velocidad de rotor recibido, en la etapa 314, para el intervalo de velocidad de rotor obtenido en la etapa 308. Se considera que el punto de ajuste de velocidad de rotor está dentro del intervalo de velocidad de rotor si está por debajo de un umbral superior del intervalo de velocidad de rotor o por encima de un umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor. Por el contrario, se considera que el punto de ajuste de velocidad de rotor está fuera del intervalo de velocidad de rotor si es igual o supera el umbral superior del intervalo de velocidad de rotor o si es igual o está por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor.

Si el punto de ajuste de velocidad de rotor está dentro del intervalo de velocidad de rotor, el proceso 300 avanza a la etapa 316, donde la velocidad de rotor se controla de tal manera que se mantenga fuera del intervalo de velocidad de rotor determinado en la etapa 308 del proceso 300. Es decir, la velocidad de rotor se mantiene intencionadamente en un valor igual a o que supere el umbral superior del intervalo de velocidad de rotor o en un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor. Debido a que el intervalo de velocidad de rotor corresponde a la zona de evitación, esto significa que las velocidades de rotor que se encuentran dentro de la zona de evitación se evitan cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor está dentro del intervalo de velocidad de rotor, evitando de este modo la excitación de las vibraciones de pala en sentido del borde. La decisión de si mantener la velocidad de rotor en un valor igual a o que supere el umbral superior del intervalo de velocidad de rotor o a un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor se basa en el desarrollo del punto de ajuste de velocidad de rotor

recibido. Es decir, si el punto de ajuste de velocidad de rotor comienza bajo y aumenta más allá del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor, entonces la velocidad de rotor se mantendrá en un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor siempre que el punto de ajuste de velocidad de rotor permanezca en el intervalo de velocidad de rotor. Por el contrario, si el punto de ajuste de velocidad de rotor comienza alto y disminuye más allá del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor, entonces la velocidad de rotor se mantendrá en un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor.

Si, en la etapa 314, se determina que el punto de ajuste de velocidad de rotor se encuentra fuera del intervalo de velocidad de rotor, el proceso 300 avanza a la etapa 318, donde la velocidad de rotor se ajusta a un valor correspondiente al punto de ajuste de velocidad de rotor. Es decir, la velocidad de rotor aumenta o disminuye a un valor correspondiente al punto de ajuste de velocidad de rotor recibido. Esta etapa 318 cubre dos situaciones generales. La primera situación es donde el punto de ajuste de velocidad de rotor se ha movido sucesivamente desde un valor dentro del intervalo de velocidad de rotor y, por lo tanto, la zona de evitación, a un valor fuera de la zona de evitación. En esta situación, la velocidad de rotor se mantiene en un valor igual a o que supera el umbral superior del intervalo de velocidad de rotor o en un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor de acuerdo con la etapa 316, y a continuación se reduce o aumenta posteriormente a un valor correspondiente al punto de ajuste de velocidad de rotor de acuerdo con la etapa 318. La segunda situación es donde el punto de ajuste de velocidad de rotor se ha movido sucesivamente a través del intervalo de velocidad de rotor y, por lo tanto, la zona de evitación, desde un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor hasta un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor. En esta situación, la velocidad de rotor se mantiene en un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor, y a continuación aumenta posteriormente a través de la zona de evitación hasta un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor. La segunda situación también cubre circunstancias en las que el punto de ajuste de velocidad de rotor se ha movido sucesivamente a través de la zona de evitación, desde un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor hasta un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor.

El proceso 300 termina en la etapa 320 que sigue la ejecución de las etapas 316, 318. Sin embargo, se prevé que el proceso 300 podría repetirse de forma continua para controlar la velocidad de rotor con respecto a la zona de evitación. En ese caso, el proceso 300 podría continuar desde la etapa inicial 302 o desde la etapa 314.

En ambas situaciones descritas anteriormente con respecto a la etapa 318, la velocidad de rotor puede aumentarse o disminuir a través del intervalo de velocidad de rotor tan rápido como sea prácticamente posible sin someter al rotor 16 y a otros sistemas mecánicos y eléctricos a cargas dinámicas altas potencialmente dañinas.

La figura 9 muestra las curvas de la velocidad de rotor en función de la velocidad del viento para la situación donde la zona de evitación esté en la región de carga parcial. En una operación de carga parcial, la energía del viento no es lo suficientemente alta para que la turbina opere a la velocidad de salida, en cambio, se controla para capturar tanta energía del viento como sea posible, en vista de posibles limitaciones, tal como una zona de evitación de la velocidad de rotor.

La figura 9 muestra la progresión conocida de la velocidad de rotor a través de la zona de evitación 400, gráfica (a), y la progresión comparativa de la velocidad de rotor a través de la zona de evitación 400 de acuerdo con la presente invención, gráfica (b).

La gráfica (a) ilustra la correlación entre la zona de evitación 400, el intervalo de velocidad de rotor 401 y un intervalo de velocidad del viento 402, y muestra la velocidad de rotor como una función lineal de la velocidad del viento. Puede verse que la progresión de la velocidad de rotor a través del intervalo de velocidad de rotor 401 y, por lo tanto, la zona de evitación 400, sigue esta función lineal. Por lo tanto, la velocidad de rotor estará dentro de la zona de evitación 400 siempre que la velocidad de rotor se encuentre dentro del intervalo de velocidad de rotor 401, dando lugar potencialmente a vibraciones de las palas 18 no deseadas en sentido del borde. Por supuesto, la probabilidad de que las palas 18 experimenten vibraciones en sentido del borde aumenta cuanto más tiempo permanece la velocidad de rotor en el intervalo de velocidad de rotor 401.

La gráfica (b) ilustra la situación donde la velocidad de rotor ha comenzado desde un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor 401 y ha aumentado a un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor 401. En esta situación, la velocidad de rotor se mantiene en un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor 401 para evitar la zona de evitación 400, y a continuación aumenta rápidamente a través del intervalo de velocidad de rotor 401 a un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor 401. Puede verse que la velocidad de rotor es una función lineal de la velocidad del viento a cada lado de la zona de evitación 400. Sin embargo, el paso rápido a través del intervalo de velocidad de rotor 401 puede caracterizarse por que la velocidad de rotor sea una función no lineal de la velocidad del viento. Es decir, la velocidad de rotor aumenta o disminuye a lo largo del intervalo de velocidad de rotor 401 de manera no lineal con respecto a la velocidad del viento con el fin de minimizar la duración durante la que la velocidad de rotor esté dentro de la zona de evitación 400, y por lo tanto, la aparición de vibraciones de las palas 18 en sentido del borde.

5 En la situación contraria a la mostrada en la gráfica (b) es donde la velocidad de rotor ha comenzado desde un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor 401 y ha disminuido a un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor 401. En esta situación, la velocidad de rotor se mantiene en un valor igual a o por encima del umbral superior del intervalo de velocidad de rotor 401 con el fin de evitar la zona de evitación 400, y a continuación se reduce rápidamente a través del intervalo de velocidad de rotor 401 a un valor igual a o por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor 401.

10 En general, el control de la velocidad de rotor puede hacerse de cualquier forma adecuada. El ajuste de la velocidad de rotor a un valor dado puede obtenerse ajustando la velocidad de acuerdo con un punto de ajuste de velocidad de rotor. Sin embargo, la velocidad de rotor también puede ajustarse por otros medios, tales como el uso de un punto de ajuste de par de rotor o un punto de ajuste de potencia de salida. Los expertos en la materia apreciarán que la invención se ha descrito únicamente a modo de ejemplo y que pueden adoptarse una variedad de enfoques alternativos sin abandonar el ámbito de la invención, como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para controlar una turbina eólica para evitar vibraciones en sentido del borde, comprendiendo el método las etapas de:
 - 5 determinar una frecuencia de modo de vórtice de una pala de rotor de la turbina eólica en función de una frecuencia de rotor medida y una frecuencia de vibración en sentido del borde predeterminada de la pala de rotor;
 - 10 determinar una zona de evitación basada en la frecuencia de modo de vórtice, siendo la zona de evitación un intervalo de velocidad de rotor; y,
 - recibir un punto de ajuste de velocidad de rotor,
 - en donde el método comprende además las etapas de:
 - 15 ajustar la velocidad de rotor a un valor fuera del intervalo de velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor está dentro del intervalo de velocidad de rotor; o,
 - 20 ajustar la velocidad de rotor a un valor correspondiente al punto de ajuste de velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor está fuera del intervalo de velocidad de rotor.
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en donde las etapas de controlar y ajustar la velocidad de rotor comprenden además las etapas de:
 - 25 mantener la velocidad de rotor en un valor igual a o por debajo de una velocidad de rotor correspondiente a un umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor recibido esté dentro del intervalo de velocidad de rotor; y,
 - 30 aumentar la velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o supera un umbral superior del intervalo de velocidad de rotor; o,
 - mantener la velocidad de rotor en un valor igual a o por encima de una velocidad de rotor correspondiente a un umbral superior del intervalo de velocidad de rotor cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor esté dentro del intervalo de velocidad de rotor; y,
 - 35 disminuir la velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o cae por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor.
3. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en donde la frecuencia de modo de vórtice determinada es una o más de un modo de vórtice hacia delante y un modo de vórtice hacia atrás.
4. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende además las etapas de:
 - 45 medir una señal indicativa del movimiento de la pala de rotor de la turbina eólica;
 - determinar un espectro de frecuencia de la señal medida en las proximidades de la frecuencia de modo de vórtice determinada;
 - 50 obtener una frecuencia central a partir del espectro de frecuencias; y,
 - ajustar la frecuencia de modo de vórtice determinada con respecto a la frecuencia central.
5. Un método de acuerdo con la reivindicación 4, en donde la frecuencia de modo de vórtice determinada se ajusta para igualar la frecuencia central.
- 55 6. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde se calculan un umbral inferior y un umbral superior de la zona de evitación, cada uno, como un porcentaje de la frecuencia de modo de vórtice determinada.
7. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, que comprende además la etapa de aumentar o disminuir la anchura de la zona de evitación.
- 60 8. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde un valor central de la zona de evitación es la frecuencia de modo de vórtice determinada.
- 65 9. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 8, en donde la etapa de aumentar la velocidad de rotor, si el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o supera el umbral superior del intervalo de velocidad de

rotor, se produce cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o supera el umbral superior del intervalo de velocidad de rotor durante un período predeterminado.

- 5 10. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 9, en donde la etapa de disminuir la velocidad de rotor si el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o cae por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor se produce cuando el punto de ajuste de velocidad de rotor iguala o cae por debajo del umbral inferior del intervalo de velocidad de rotor durante un período predeterminado.
- 10 11. Un método de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en donde la velocidad de rotor dentro del intervalo de velocidad de rotor es una función no lineal de la velocidad del viento.
12. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 11, en donde la velocidad de rotor aumenta o disminuye de manera no lineal con respecto a la velocidad del viento.
- 15 13. Un controlador para un sistema de control de turbinas eólicas que comprende un procesador y un módulo de memoria, en donde el módulo de memoria comprende un conjunto de instrucciones de código de programa que, cuando son ejecutadas por el procesador, implementan un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.
- 20 14. Una turbina eólica que comprende el controlador de la reivindicación 13.
- 25 15. Un producto de programa informático descargable desde una red de comunicación y/o almacenado en un medio legible por máquina que comprende unas instrucciones de código de programa que, cuando el programa es ejecutado por un ordenador, hacen que el ordenador realice un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

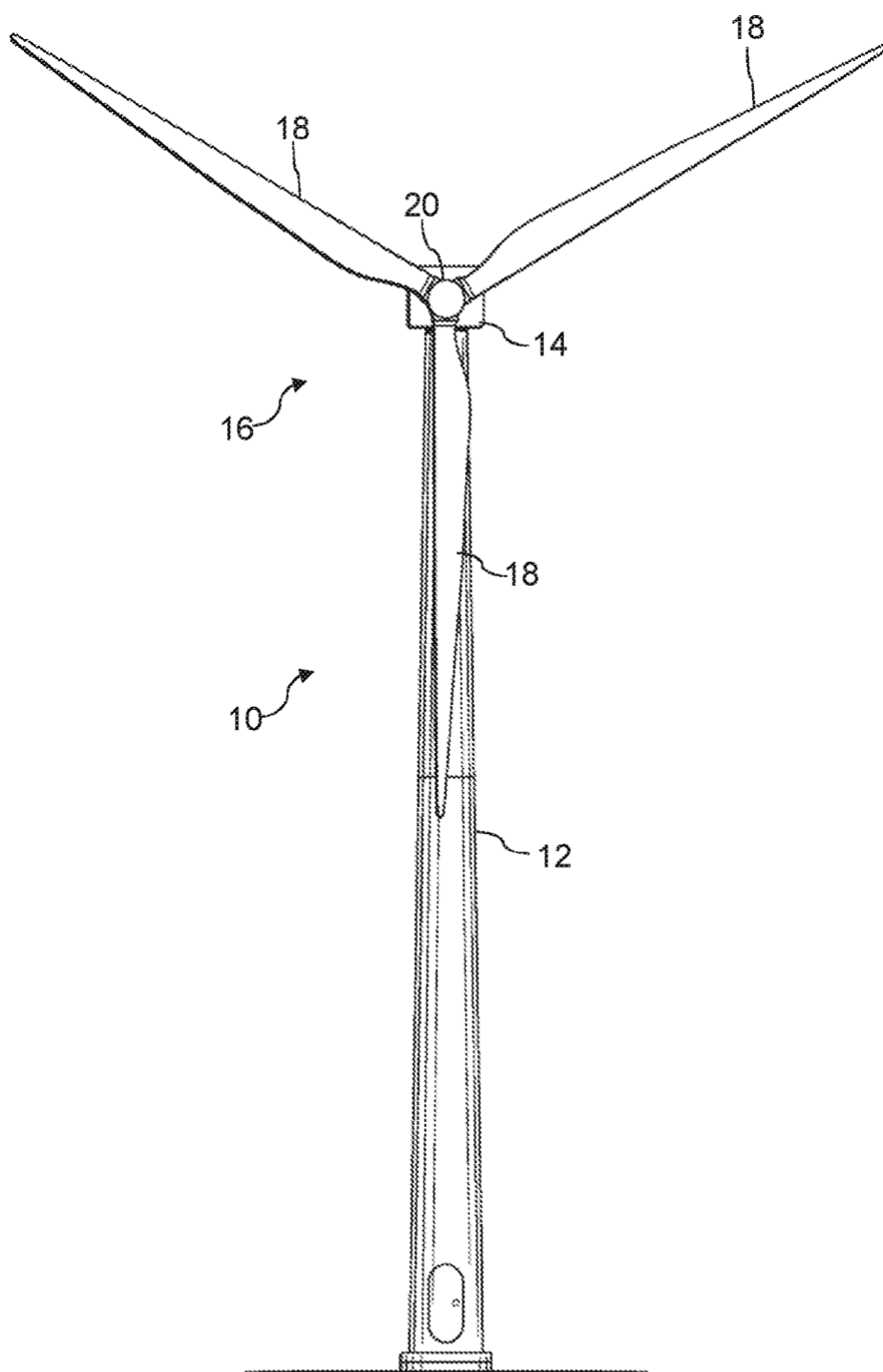


Fig. 1

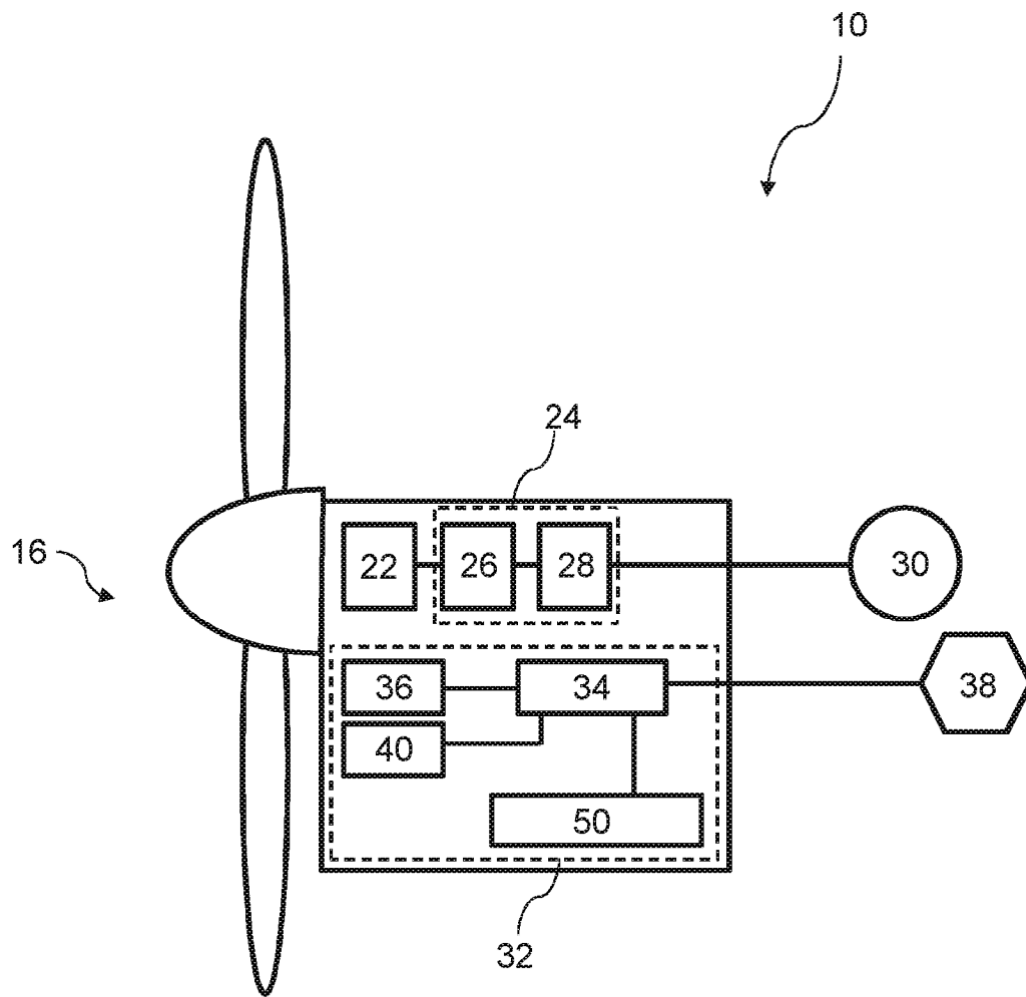


Fig. 2

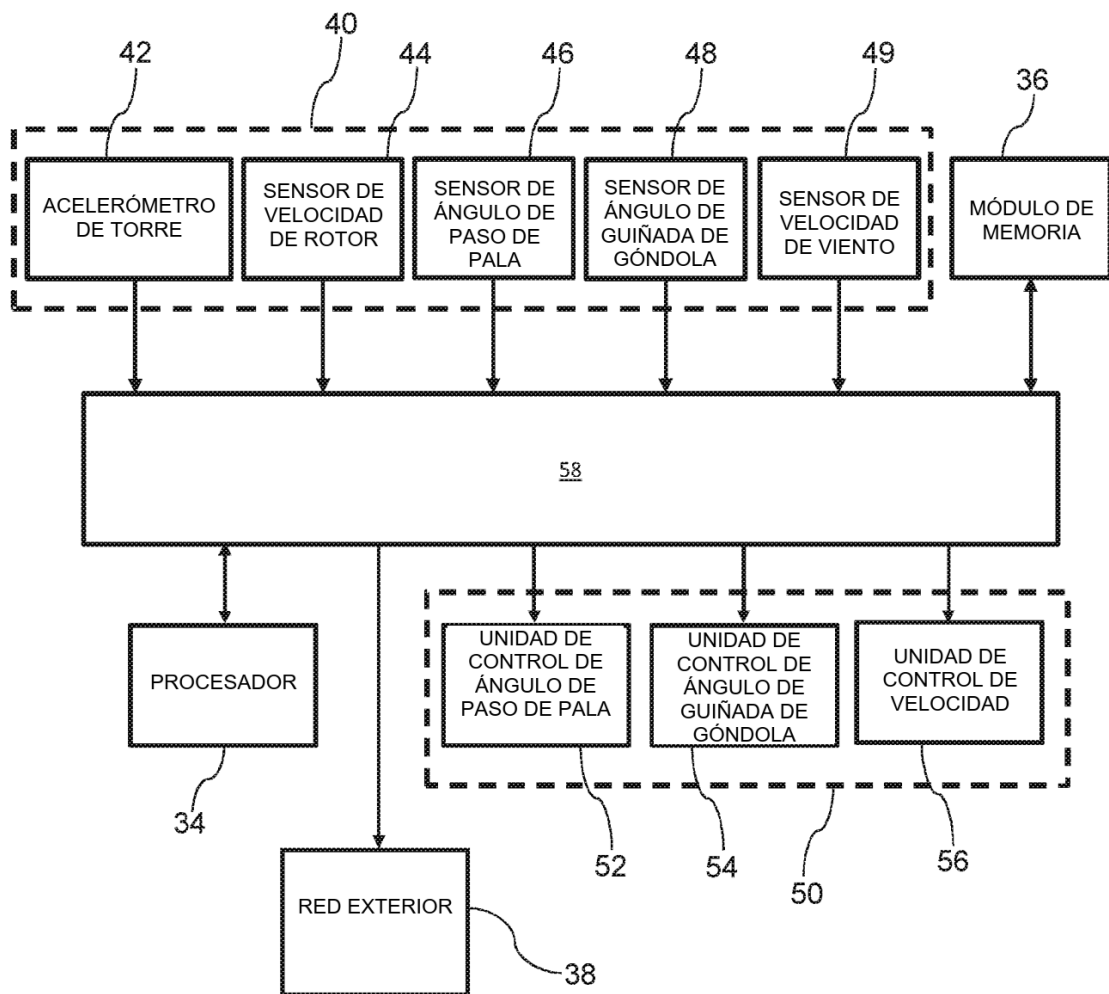


Fig. 3

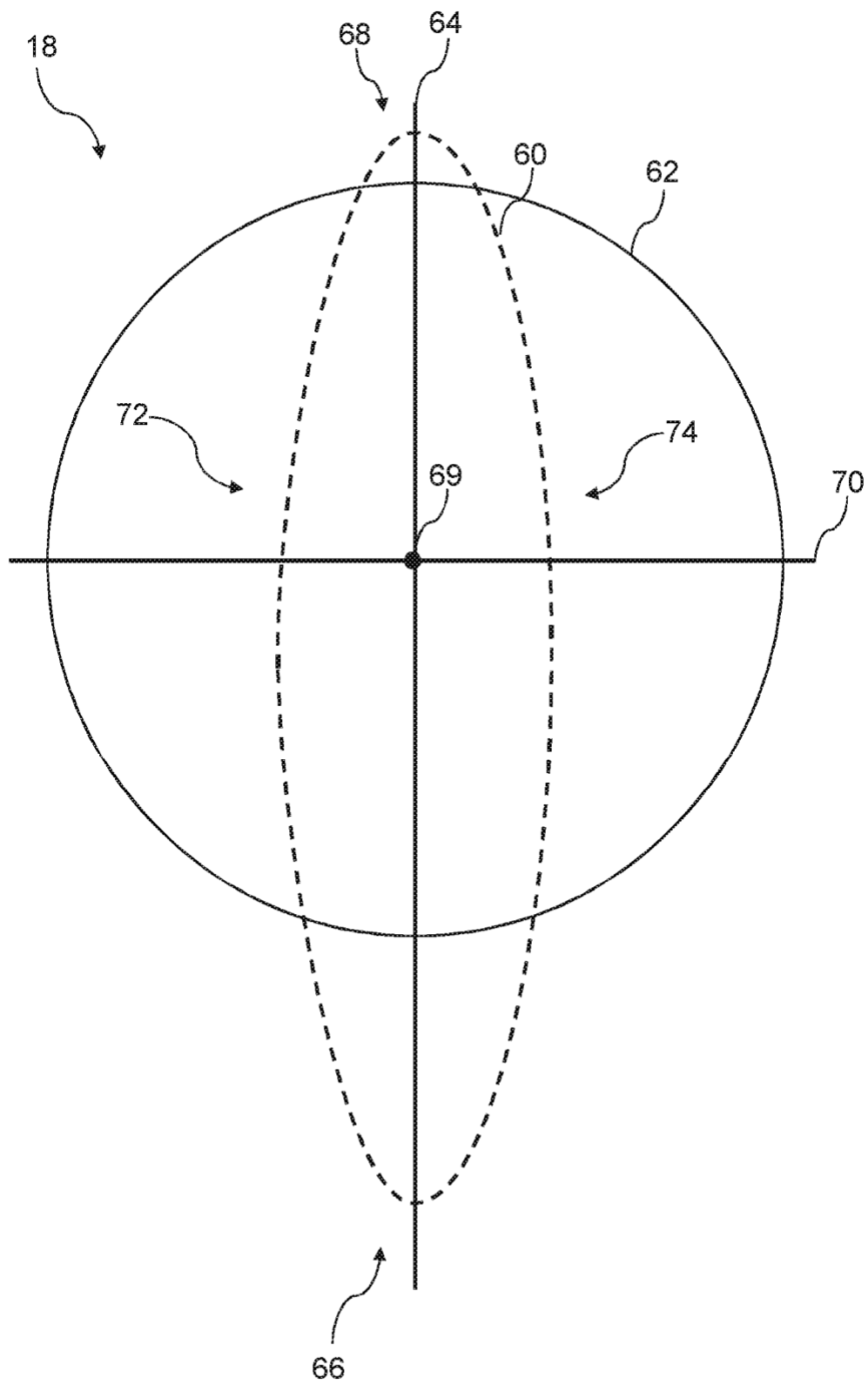


Fig. 4

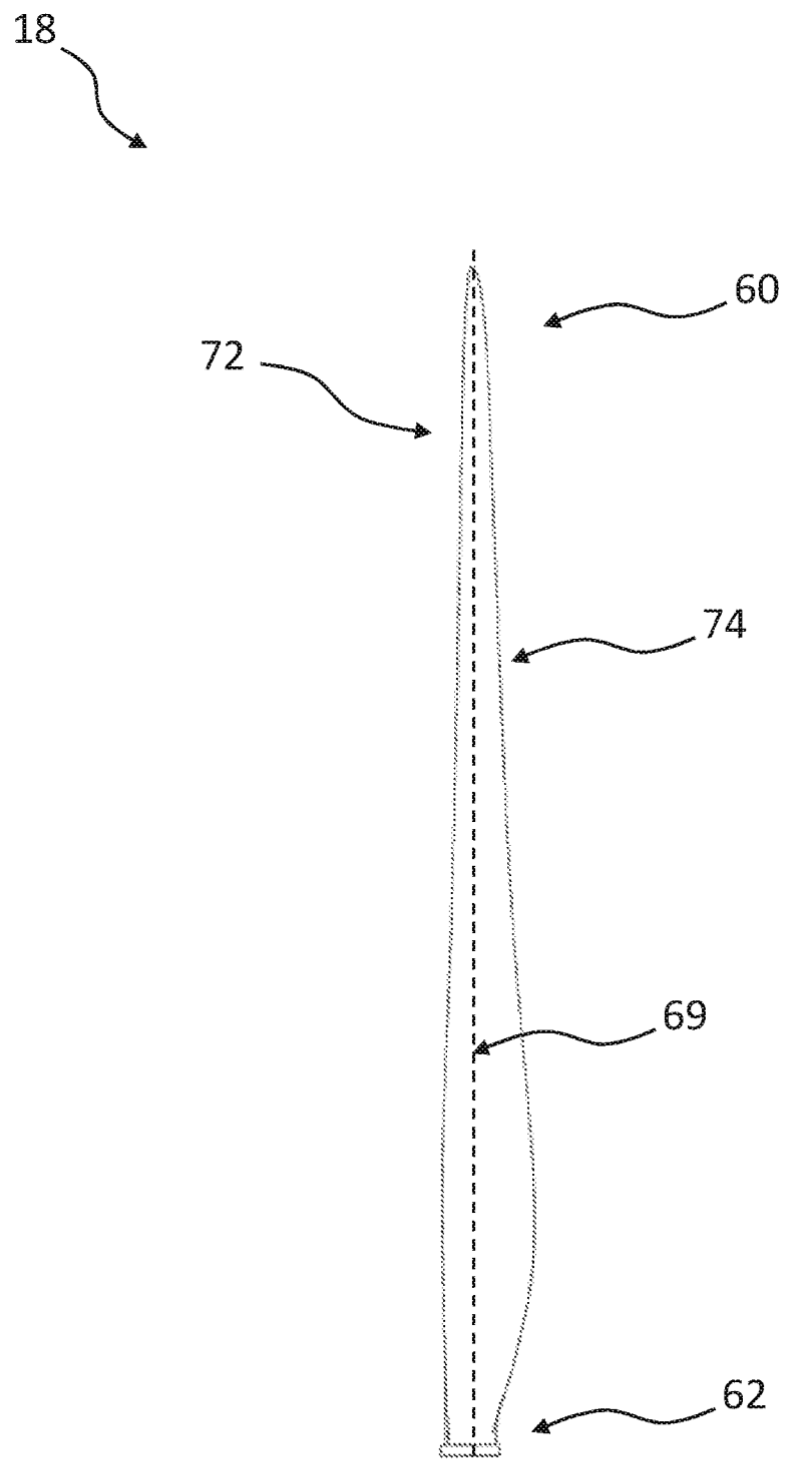


Fig. 5

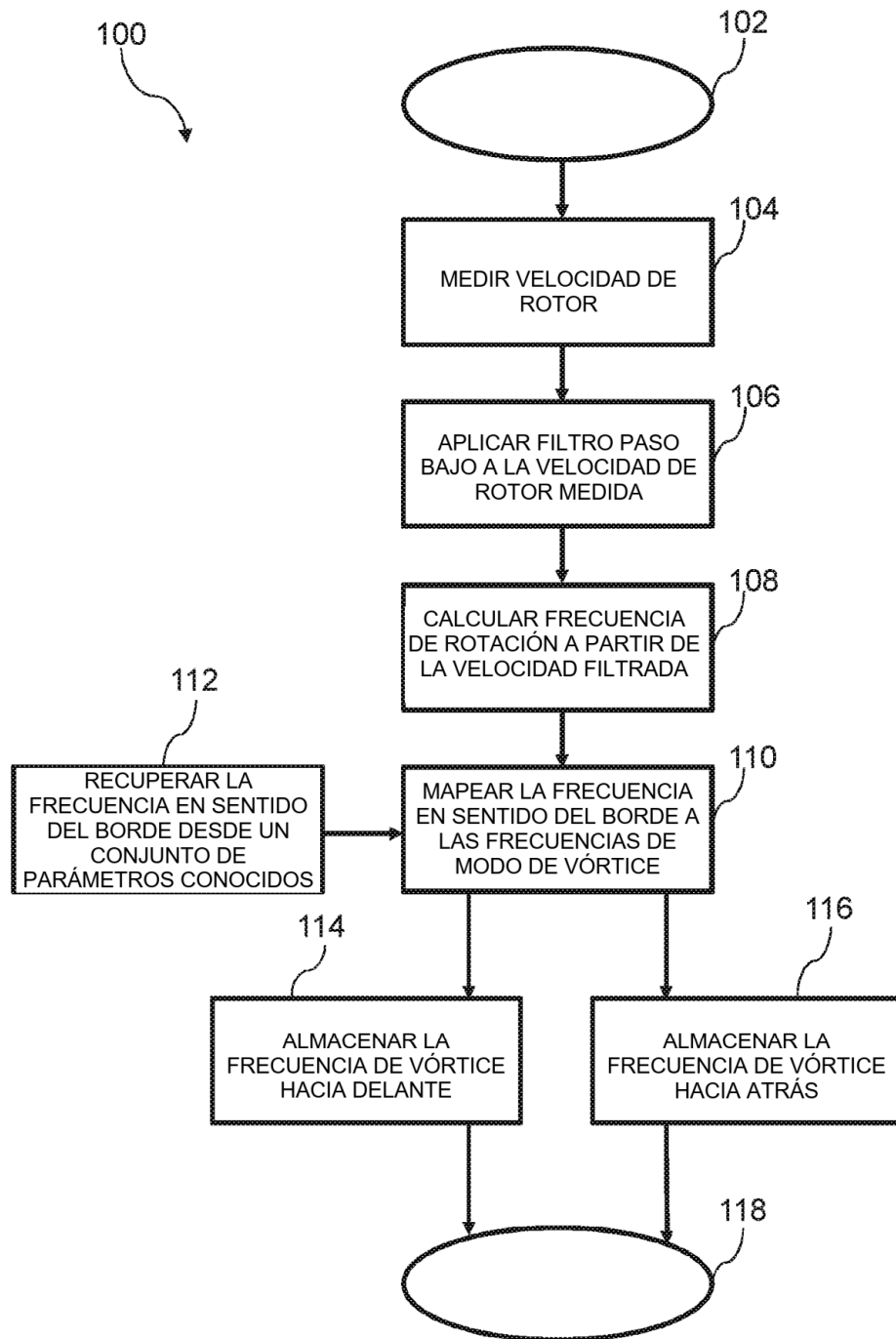


Fig. 6

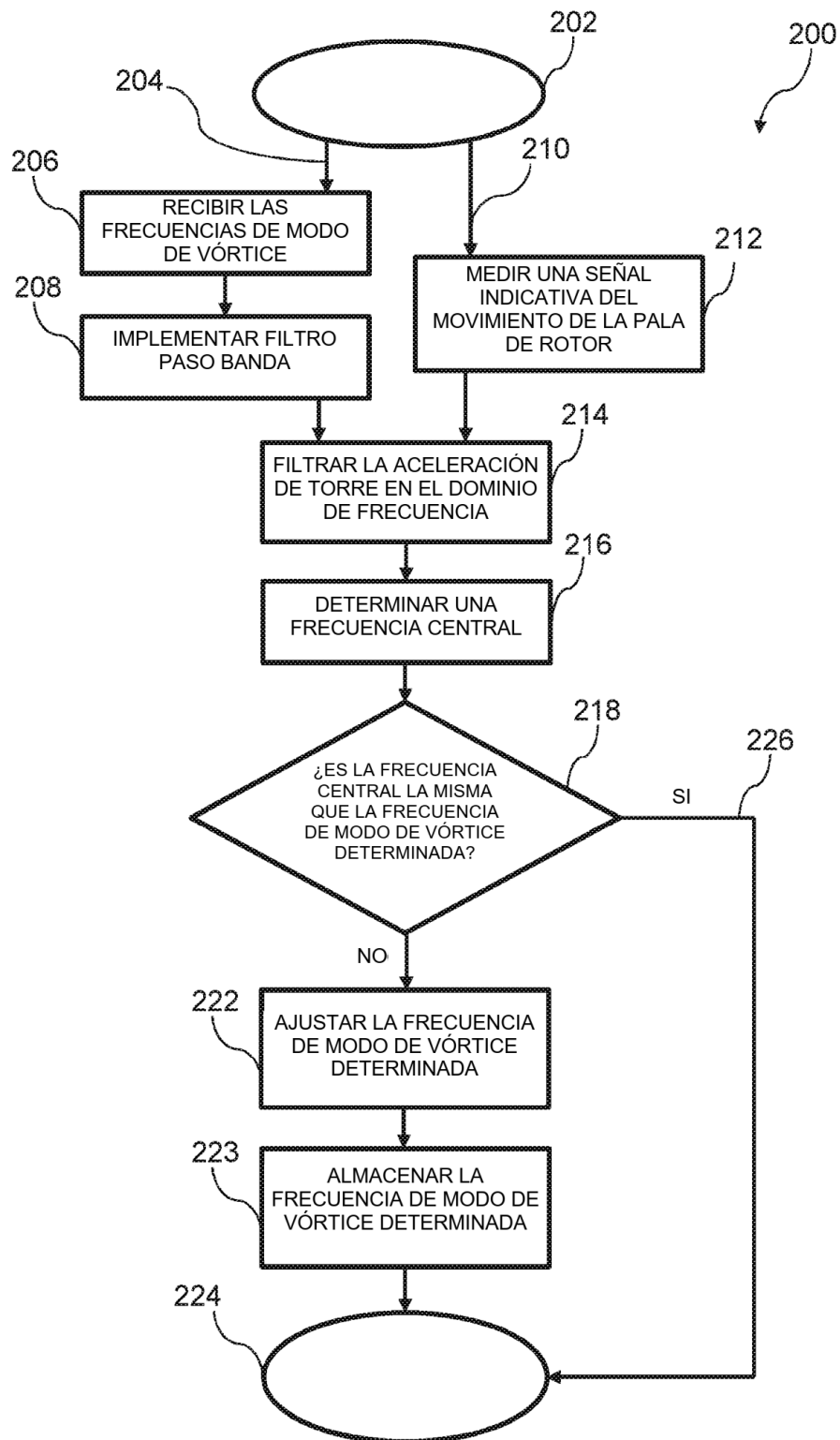


Fig. 7

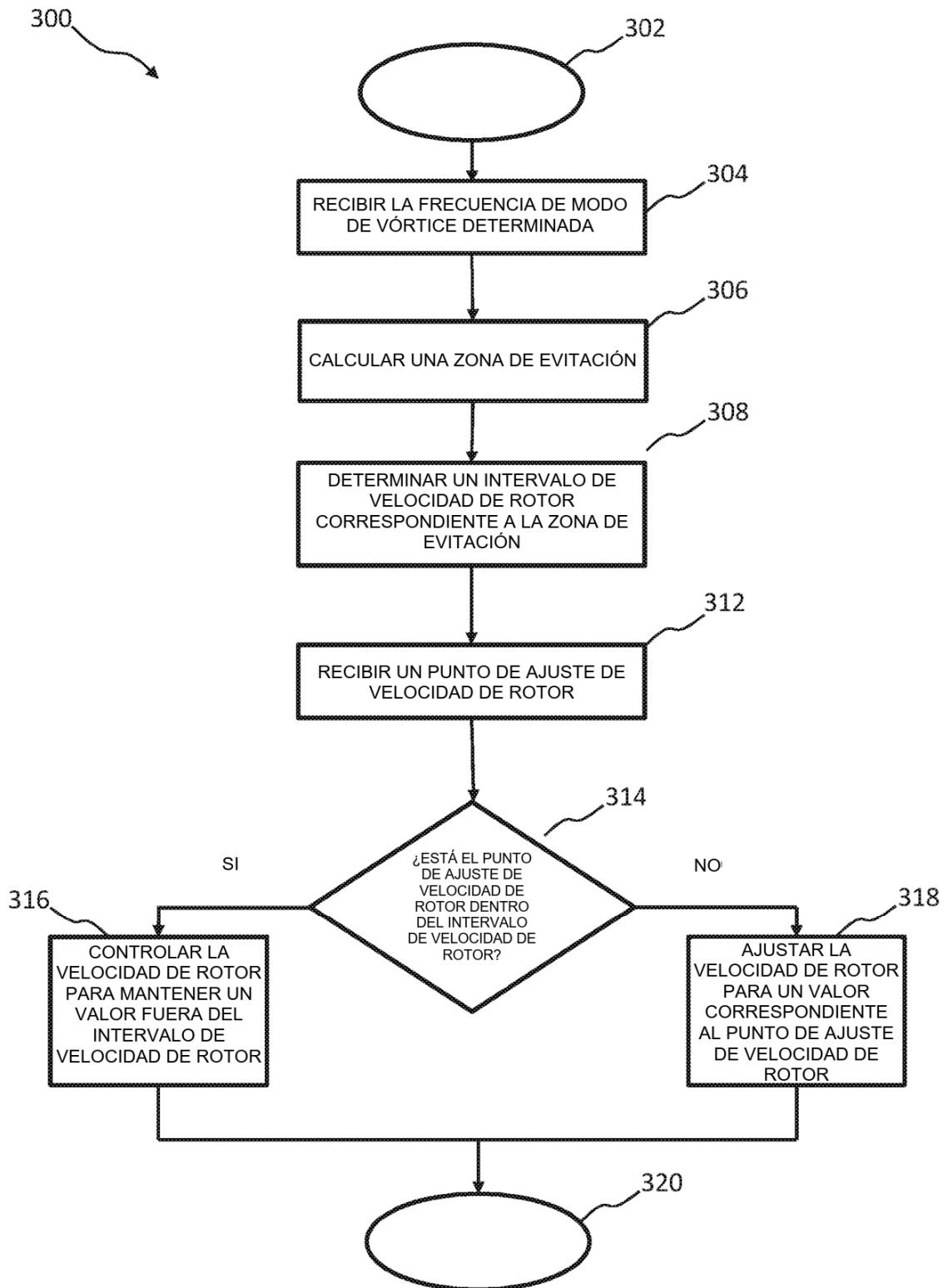
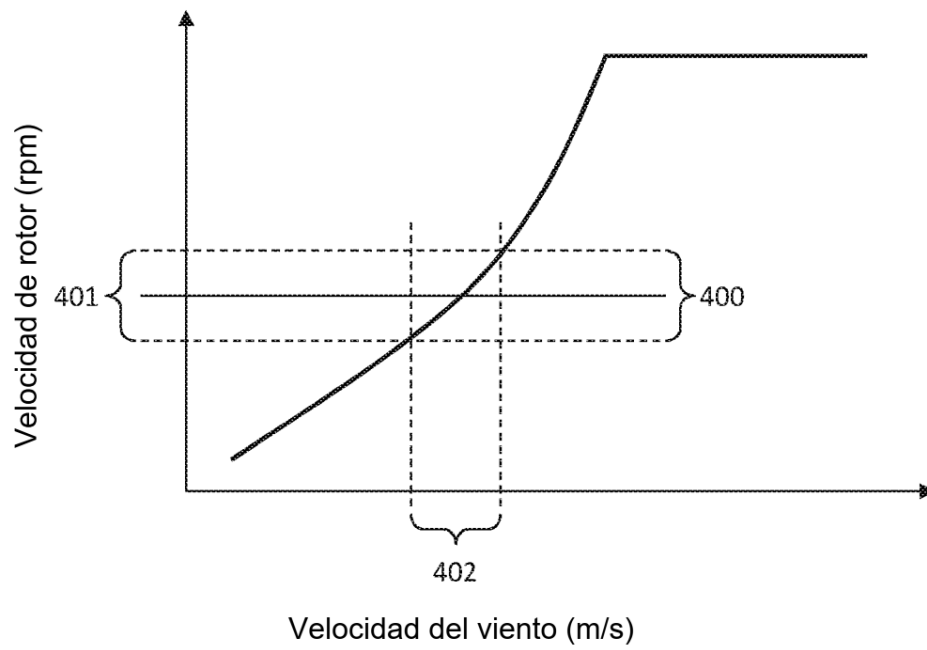
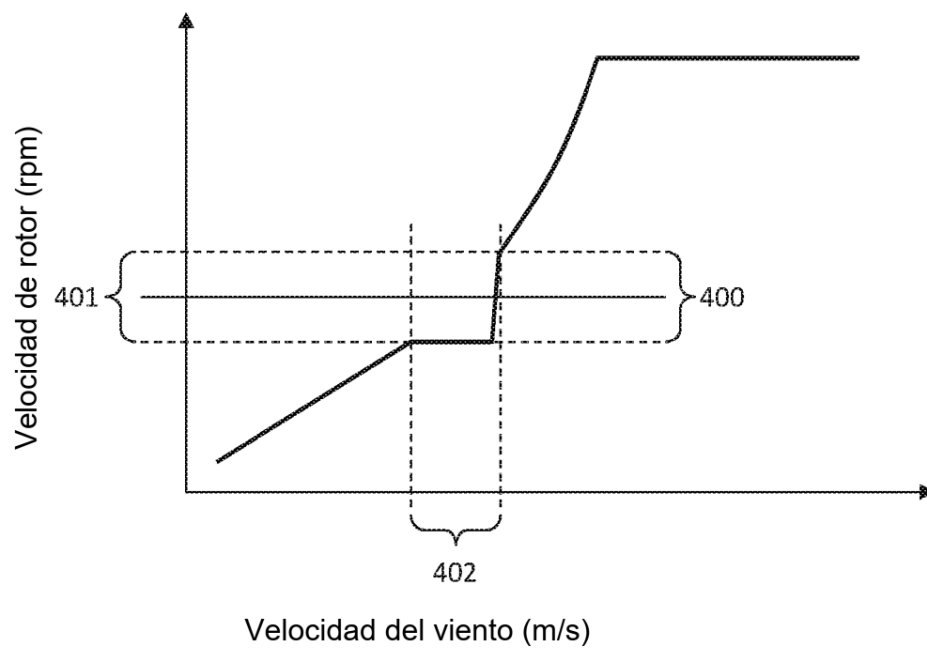


Fig. 8



(a)



(b)

Fig. 9