

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 628 963**

51 Int. Cl.:

**F03D 13/20** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 13/25** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.07.2013 PCT/DK2013/050254**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.01.2014 WO14015882**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.07.2013 E 13745574 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.05.2017 EP 2877739**

54 Título: **Turbina eólica inclinable**

30 Prioridad:

**26.07.2012 US 201261675886 P**

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

**04.08.2017**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)  
Hedeager 42  
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**HAMMERUM, KELD;  
HERBSLEB, EIK;  
LARSEN, LARS FINN SLOTH y  
CAPONETTI, FABIO**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 628 963 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**

Turbina eólica inclinable

5 La presente invención se refiere a turbinas eólicas inclinables y en particular a turbinas eólicas que pueden inclinarse respecto a una posición vertical.

10 Las turbinas eólicas aprovechan la energía eólica para generar energía eléctrica y se han convertido en cada vez más populares como una fuente de energía alternativa a las fuentes tradicionales para generación de energía eléctrica. El aprovechamiento de la energía eólica se considera que es una fuente más sostenible y más limpia para la generación de energía eléctrica.

15 Para generar energía eléctrica a partir de la energía eólica, las turbinas eólicas 101 comprenden típicamente una torre 102 que se basa sobre una cimentación estable 103, una góndola 104 localizada sobre la torre 102 para alojar los aparatos eléctricos y mecánicos, tales como el generador, y un rotor 105 con una o más palas 106 de turbina conectadas a la góndola tal como se muestra en la Figura 1. En términos básicos y simplistas, las palas de la turbina giran por la energía eólica incidente, lo que acciona un generador para producir energía eléctrica.

20 Una turbina eólica es cara de fabricar y por lo tanto una motivación clave en el desarrollo de las turbinas eólicas es la necesidad de reducir el coste de una turbina eólica para hacer de las turbinas eólicas una solución económica para generación de energía eléctrica.

25 El documento US7891939B1 describe una torre de turbina giratoria. La torre gira para mantener la turbina enfrentada al viento.

El documento EP2472105A2 describe un conjunto de plataforma flotante que permite la orientación de la plataforma para obtener condiciones de máxima eficiencia en la turbina eólica.

30 La presente invención busca acometer, al menos en parte, las necesidades y desventajas descritas en el presente documento anteriormente.

De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención se proporciona una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 1.

35 Las cargas sobre una torre de turbina eólica pueden reducirse ventajosamente mediante la inclinación de la torre respecto a una posición vertical.

40 La torre puede inclinarse hasta un ángulo de inclinación predeterminado en una dirección del viento predominante. La dirección del viento predominante puede determinarse basándose en unos análisis de las condiciones del viento en una localización de la turbina eólica. El ángulo de inclinación predeterminado puede determinarse basándose en un análisis de las condiciones del viento en una localización de la turbina eólica.

45 Puede analizarse la localización en la que puede montarse la turbina eólica, por ejemplo, mediante la determinación de una rosa de los vientos. La rosa de los vientos puede mostrar la dirección del viento y/o velocidades del viento en la localización y puede identificarse a partir de lecturas de sensores, por ejemplo, un mástil meteorológico que ha estado en la localización durante una cantidad de tiempo predeterminada, por ejemplo un año o cualquier otro periodo de tiempo adecuado para obtener una indicación de la dirección y velocidad del viento en la localización. Pueden medirse también otras condiciones del emplazamiento en la localización, por ejemplo turbulencia del viento, temperatura, densidad del aire y otros similares. Basándose en al menos una información de la rosa de los vientos  
50 puede identificarse la dirección del viento predominante y la torre de la turbina eólica puede inclinarse respecto a una posición vertical en la dirección del viento predominante. El ángulo de inclinación para la inclinación de la torre puede fijarse como un valor específico, por ejemplo 1 grado a 2 grados, o puede determinarse basándose en la velocidad del viento y/o la dirección del viento de modo que la reducción en las cargas sobre la torre sea proporcional a la inclinación de la torre en la dirección del viento predominante. La torre puede inclinarse entonces  
55 respecto a la posición vertical en el ángulo de inclinación predeterminado.

60 La cimentación es una cimentación fija, por ejemplo una cimentación sólida en el terreno. En un ejemplo adicional que no es parte de la presente invención y que se proporciona solamente por referencia, la cimentación puede ser una plataforma flotante para una turbina eólica marina.

65 La torre puede inclinarse de modo fijo hasta un ángulo de inclinación predeterminado de modo que la torre puede inclinarse permanentemente respecto a la posición vertical. Por lo tanto, la turbina eólica puede montarse con una inclinación permanente respecto a la posición vertical en la dirección del viento dominante para reducir las cargas sobre la torre de la turbina eólica. La turbina eólica puede comprender adicionalmente un dispositivo conectado operativamente a la torre, en el que el dispositivo permite a la torre inclinarse alrededor de uno o más ejes y la torre se conecta a la cimentación mediante el dispositivo. El dispositivo permite a la torre de la turbina eólica girar o

inclinarse alrededor de uno o más ejes para inclinar la torre respecto a la posición vertical. La ventaja de permitir a la torre girar o inclinarse alrededor de uno o más ejes es que, independientemente de la dirección del viento, pueden reducirse las cargas sobre la torre mediante la inclinación de la torre respecto a la posición vertical en la dirección del viento actual.

5 El dispositivo puede ser uno o más de una articulación, una plataforma, un elemento flexible, una junta y una articulación esférica.

10 La turbina eólica puede comprender adicionalmente uno o más dispositivos de seguridad, en los que el dispositivo de seguridad puede impedir que la turbina eólica se incline adicionalmente más de un ángulo de inclinación predeterminado.

15 La turbina eólica puede comprender adicionalmente un controlador adaptado para determinar un ángulo de inclinación para la turbina eólica; y el controlador está adaptado adicionalmente para alterar un parámetro de operación de la turbina eólica de modo que la turbina eólica se incline al ángulo de inclinación determinado en el que la turbina eólica está equilibrada entre una fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica y la gravedad que actúa sobre la turbina eólica.

20 El controlador puede adaptarse adicionalmente para determinar un ángulo de inclinación óptimo en el que el ángulo de inclinación óptimo proporciona una producción de energía eléctrica óptima por parte de la turbina eólica.

El controlador puede adaptarse adicionalmente para identificar el ángulo de inclinación a partir de una tabla de búsqueda; o calcular el ángulo de inclinación en tiempo real.

25 El controlador puede adaptarse adicionalmente para determinar un ángulo de paso para una o más palas de turbina de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado; y/o determinar un par del generador para un generador de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado.

30 El controlador puede adaptarse adicionalmente para identificar un ángulo de inclinación actual de la turbina eólica; determinar una diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación determinado; y alterar los parámetros de operación de la turbina eólica basándose en la diferencia determinada.

35 El controlador puede ser, o incluir, uno o más de entre un procesador, memoria, entradas, salidas, y así sucesivamente de modo que el controlador puede realizar las funciones y características de los aspectos de la invención.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención se proporciona un método de acuerdo con la reivindicación 11.

40 El método puede comprender adicionalmente la determinación de una dirección del viento predominante; y la inclinación de la torre en un ángulo de inclinación predeterminado en la dirección del viento predominante.

El método puede comprender adicionalmente la determinación del ángulo de inclinación predeterminado basándose en un análisis de las condiciones del viento en una localización de la turbina eólica.

45 El método puede comprender adicionalmente la determinación de un ángulo de inclinación para la turbina eólica; y alterar un parámetro de operación de la turbina eólica de modo que la turbina eólica se incline hasta el ángulo de inclinación determinado y la turbina eólica se equilibre entre la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica y la gravedad que actúa sobre la turbina eólica.

50 La determinación del ángulo de inclinación puede comprender adicionalmente la determinación de un ángulo de inclinación óptimo en el que el ángulo de inclinación óptimo proporciona una producción de energía eléctrica óptima por parte de la turbina eólica.

55 La determinación del ángulo de inclinación puede comprender adicionalmente la identificación del ángulo de inclinación a partir de una tabla de búsqueda; o el cálculo del ángulo de inclinación en tiempo real.

60 La alteración del parámetro de operación de la turbina eólica puede comprender adicionalmente la determinación de un ángulo de paso para una o más palas de turbina de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado; y/o determinar un par del generador para un generador de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado.

65 El método puede comprender adicionalmente la identificación de un ángulo de inclinación actual de la turbina eólica; la determinación de una diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación determinado; y la alteración de los parámetros de operación de la turbina eólica se basa en la diferencia determinada.

El método puede implementarse por un controlador que puede ser un controlador que ya es parte de una turbina eólica o puede ser un controlador separado. El controlador puede incluir cualquier número de procesadores, memoria, entradas/salidas para implementar el método.

5 Puede determinarse un ángulo de inclinación para una turbina eólica en donde el ángulo de inclinación puede ser un ángulo en el que la turbina eólica puede inclinarse de modo que la turbina eólica puede equilibrarse entre una fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica provocada por el viento incidente y la gravedad que actúa sobre la turbina eólica. Pueden alterarse uno o más parámetros de operación de la turbina eólica para inclinar la turbina eólica en el ángulo de inclinación determinado.

10 La etapa de alteración de los parámetros de operación puede incluir la alteración directamente de los parámetros de operación o el inicio/instrucción a uno o más de otros controladores o sistemas para alterar o cambiar el (los) parámetro(s) de operación.

15 La etapa de determinación del ángulo de inclinación puede comprender adicionalmente la etapa de determinación de un ángulo de inclinación óptimo en el que el ángulo de inclinación óptimo proporciona producción óptima de energía eléctrica por parte de la turbina eólica. Puede haber más de un ángulo de inclinación en el que la turbina eólica pueda estar equilibrada o en equilibrio entre la fuerza de empuje y la gravedad que actúa sobre la turbina eólica.

20 También, mediante la alteración del parámetro de operación de la turbina eólica (por ejemplo, un ángulo de paso de una o más palas de turbina) en diferentes cantidades, entonces pueden conseguirse diferentes ángulos de inclinación en los que la turbina eólica pueda estar equilibrada entre la fuerza de empuje y la gravedad.

25 Por lo tanto, el controlador puede determinar el ángulo de inclinación óptimo para la turbina eólica de modo que se genere o produzca la energía eléctrica óptima por parte de la turbina eólica. El ángulo de inclinación óptimo puede determinarse basándose en al menos la velocidad del viento. La velocidad del viento puede medirse o estimarse. La velocidad del viento medida puede tomarse en la turbina eólica o aguas arriba de la turbina eólica y puede medirse usando sensores tales como un anemómetro, o un dispositivo de Detección y Localización por Luz (LiDAR). El sensor puede localizarse en la turbina eólica o estar separado de la turbina eólica. La velocidad del viento puede estimarse o deducirse, por ejemplo, a partir de la producción de energía eléctrica de la turbina eólica, velocidad del rotor y otros similares.

30 La etapa de determinación del ángulo de inclinación puede comprender adicionalmente la identificación del ángulo de inclinación a partir de una tabla de búsqueda; o el cálculo del ángulo de inclinación en tiempo real.

35 La etapa de alterar el parámetro de operación de la turbina eólica puede comprender adicionalmente las etapas de determinación de un ángulo de paso para una o más palas de turbina de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado; y/o la determinación de un par del generador para un generador de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado.

40 En consecuencia, los parámetros de operación que pueden cambiarse pueden incluir el ángulo de paso de las palas de turbina y/o el par generador del generador en la turbina eólica.

45 El método puede comprender adicionalmente las etapas de identificación de un ángulo de inclinación actual de la turbina eólica; determinación de la diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación determinado; y la etapa de alteración de los parámetros de operación de la turbina eólica se basa en la diferencia determinada.

50 En consecuencia, el ángulo de inclinación de la turbina eólica puede medirse y/o seguirse de modo que pueda determinarse una diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación requerido. El ángulo de inclinación actual de la turbina eólica puede medirse, estimarse o deducirse a partir de sensores, tales como extensómetros, inclinómetros, acelerómetros, fijados a o localizados en la turbina eólica. El ángulo de inclinación actual puede medirse, estimarse o deducirse a partir de sensores o dispositivos separados respecto a la turbina eólica tales como un sistema de cámara, sistema de infrarrojos y otros similares.

55 El método puede comprender adicionalmente un supervisor. El supervisor puede limitar la alteración de los parámetros de operación para mejorar adicionalmente la estabilidad de la turbina eólica inclinada. El supervisor puede establecer o aplicar límites, o bien constantemente o bajo ciertas condiciones de operación (por ejemplo, velocidades de viento altas, velocidades de viento bajas y otras similares), para impedir que la turbina eólica oscile o caiga eficazmente.

60 El método puede comprender adicionalmente la operación de la turbina eólica en un modo motor. El modo motor gira eficazmente la turbina eólica como un ventilador. Por lo tanto, mediante la operación de la turbina eólica en un modo motor puede estabilizarse adicionalmente la turbina eólica o usarse como un mecanismo de seguridad para impedir o recuperarse desde una inclinación demasiado alejada en cualquier dirección. El parámetro de operación o el par del generador pueden alterarse para cambiar la turbina eólica a un modo motor.

En un ejemplo que no es parte de la invención se proporciona un controlador que comprende:

un primer procesador adaptado para determinar un ángulo de inclinación para la turbina eólica; y un segundo procesador adaptado para alterar un parámetro de operación de la turbina eólica de modo que la turbina eólica se incline en un ángulo de inclinación determinado y la turbina eólica se equilibre entre una fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica y la gravedad que actúa sobre la turbina eólica.

El primer procesador puede adaptarse adicionalmente para determinar un ángulo de inclinación óptimo en el que el ángulo de inclinación óptimo proporciona una producción de energía eléctrica óptima por parte de la turbina eólica.

El primer procesador puede adaptarse adicionalmente para identificar el ángulo de inclinación a partir de una tabla de búsqueda; o calcular el ángulo de inclinación en tiempo real.

El segundo procesador puede adaptarse adicionalmente para determinar un ángulo de paso para una o más palas de turbina de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado; y/o determinar un par del generador para un generador de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado.

El controlador puede comprender adicionalmente un tercer procesador adaptado para identificar un ángulo de inclinación actual de la turbina eólica; un cuarto procesador adaptado para determinar una diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación determinado; y el segundo procesador se adapta adicionalmente para alterar los parámetros de operación de la turbina eólica basándose en la diferencia determinada.

Del primer procesador al cuarto procesador pueden ser el mismo procesador, diferentes procesadores, o cualquier combinación de los mismos. El controlador puede comprender cualquier hardware, software o cualquier combinación de los mismos para implementar cualquiera o todas las características o funciones de la presente invención.

En un ejemplo, puede proporcionarse un producto de programa informático que comprende código ejecutable legible por ordenador para: determinar un ángulo de inclinación para la turbina eólica; y alterar un parámetro de operación de la turbina eólica de modo que la turbina eólica se incline hasta el ángulo de inclinación determinado y la turbina eólica se equilibre entre una fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica y la gravedad que actúa sobre la turbina eólica.

El producto de programa informático puede comprender código ejecutable legible por ordenador de implementación de cualquiera o todas las características y funciones de la presente invención.

En un ejemplo, puede proporcionarse una turbina eólica que comprende: una torre; una góndola; una o más palas de turbina fijadas a un rotor que se fija a la góndola; y un dispositivo conectado operativamente a la torre, en el que el dispositivo permite a la torre inclinarse alrededor de uno o más ejes.

El dispositivo puede ser uno o más de una articulación, una plataforma, un elemento flexible, una junta y una articulación esférica.

La turbina eólica puede comprender adicionalmente uno o más dispositivos de seguridad, en el que los dispositivos de seguridad impiden que la turbina eólica se incline adicionalmente más de un ángulo de inclinación predeterminado.

Se describirán ahora realizaciones de la presente invención, a modo de ejemplo solamente, y con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

la Figura 1 muestra un diagrama simplificado de una turbina eólica.

La Figura 2 muestra un diagrama simplificado de una turbina eólica inclinable de acuerdo con muchas de las realizaciones de la presente invención.

La Figura 3 muestra un diagrama simplificado de una turbina eólica inclinable de acuerdo con muchas de las realizaciones de la presente invención.

La Figura 4 muestra una serie de dispositivos de seguridad para una turbina eólica articulada de acuerdo con muchas de las realizaciones de la presente invención.

La Figura 5 muestra un diagrama simplificado de una turbina eólica flotante inclinable que no es parte de la presente invención y proporcionada solamente para referencia.

La Figura 6 muestra una rosa de los vientos de ejemplo de acuerdo con muchas realizaciones de la presente invención.

La Figura 7 muestra una envolvente de ejemplo de la carga de momentos de la parte inferior de la torre correspondiente a la rosa de los vientos de la Figura 6.

La figura 8 muestra una envolvente de ejemplo de la carga de momentos de la parte inferior de la torre para una torre inclinada de acuerdo con muchas de las realizaciones de la presente invención.

Como se ha descrito en el presente documento anteriormente, una turbina eólica comprende típicamente una torre

102 que se basa en una cimentación estable 103, una góndola 104 localizada sobre la torre 102 para alojar los aparatos eléctricos y mecánicos, tales como el generador, y un rotor 105 con una o más palas 106 de la turbina conectadas a la góndola 104.

5 En funcionamiento, la fuerza de la energía eólica incidente sobre las palas 106 de la turbina provoca que el rotor gire y también provoca una fuerza de empuje sobre la turbina eólica 101 que empuja efectivamente la turbina eólica 101 hacia atrás. De ese modo, la torre 102 se diseña y fabrica para soportar las fuerzas de empuje que actúan sobre la turbina eólica 101. El coste de la torre 102 es una proporción significativa del coste de la turbina eólica 101 y de ese modo, si pueden reducirse los costes de la torre 102, entonces también se reducirá el coste de la turbina eólica.

10 El principal coste en la fabricación de la torre 102 es la realización de la torre 102 suficientemente fuerte para soportar las fuerzas de empuje que actúan sobre la torre 102. La fuerza de empuje empuja efectivamente a la turbina eólica hacia atrás creando un momento sobre la torre 102 y en particular en la base de la torre 102. Por lo tanto, si los momentos experimentados por la torre 102 pueden reducirse, entonces la torre 102 puede diseñarse para que incluya menos material, lo que a su vez puede reducir los costes de la torre haciendo a la turbina eólica 101 más económica.

15 Se ha identificado que los momentos experimentados por la torre 102 pueden reducirse ventajosamente mediante el reclinado de la torre 102 en la dirección del viento. La torre 102 puede inclinarse hacia el viento mediante una cimentación fija, mediante un dispositivo que permita a la torre 102 girar o inclinarse alrededor de uno o más ejes, o mediante una combinación de fijación o mantenimiento del dispositivo que permite a la torre 102 inclinarse o girar durante un período de tiempo y liberar el dispositivo para permitir la inclinación o giro de la torre 102 durante otros períodos de tiempo que pueden depender de las condiciones (por ejemplo, condiciones del viento) o de la operación de las turbinas eólicas.

20 De ese modo, la presente invención permite ventajosamente que la torre se recline hacia al menos la dirección del viento principal o más fuerte para reducir los momentos sobre la base de la torre 102.

25 El sitio o localización de una planta de generación eólica (WPP, del inglés "*Wind Power Plant*") se analiza típicamente y se examina previamente al montaje de una o más turbinas eólicas para formar la WPP en la localización deseada. Como parte del análisis, puede ser útil determinar la denominada rosa de los vientos del emplazamiento, lo que puede obtenerse a través de un mástil meteorológico. Se muestra en la Figura 6 un ejemplo de rosa de los vientos para un emplazamiento específico. Como se apreciará, la rosa de los vientos es específica del emplazamiento y por lo tanto deberían esperarse diferentes patrones de rosa de los vientos para cada emplazamiento. La rosa de los vientos puede determinarse o identificarse para un emplazamiento completo, para diferentes áreas del emplazamiento, que pueden depender de las condiciones del terreno/emplazamiento, para grupos de localizaciones de turbina eólica propuestos, o para cualquier otra finalidad.

30 Como puede verse a partir del ejemplo de rosa de los vientos de la Figura 6, la dirección del viento y la velocidad del viento son asimétricas en este emplazamiento. Más aún, la velocidad y dirección del viento es significativamente mayor y predominantemente desde el cuadrante suroeste con el pico de velocidad del viento y dirección del viento presentes en la dirección Sur-Oeste. Dado que la dirección del viento y la velocidad del viento en este ejemplo se desvían hacia el cuadrante suroeste, entonces los momentos sobre la base de la torre serán significativamente mayores desde el viento en esta dirección que desde las otras direcciones.

35 La Figura 7 muestra una envolvente de ejemplo de cargas de momentos de la parte inferior de la torre que puede experimentar una torre cuando se somete a la rosa de los vientos asimétrica mostrada en la Figura 6. Como puede verse a partir de la Figura 7, las cargas de momentos sobre la parte inferior de la torre son mayores en el cuadrante suroeste dado que esta es la dirección y velocidad del viento predominante que afectará a la turbina eólica cuando se coloque en esta localización.

40 Sin embargo, las torres de turbina eólica tienen típicamente que fabricarse suficientemente fuertes para soportar todas las fuerzas, cargas de momentos y/o cargas de fatiga que puedan experimentar durante su vida útil, típicamente 20 años. En consecuencia, la torre tendrá que fabricarse con suficiente material y resistencia para soportar las cargas de momentos de pico y cargas de fatiga que experimentará en el cuadrante suroeste en este ejemplo, incluso aunque las cargas de momentos y cargas de fatiga en los otros cuadrantes de la envolvente de cargas de momentos de la parte inferior de la torre sean significativamente menores.

45 Por lo tanto, se ha identificado que las cargas de momentos y/o cargas de fatiga sobre la parte inferior de la torre, por ejemplo la base de la torre, pueden reducirse ventajosamente mediante el reclinado o inclinación de la torre de la turbina eólica hacia la dirección de viento y/o velocidad del viento predominante.

50 Basándose en la rosa de los vientos para el emplazamiento específico, se muestra en la Figura 7 la rosa de los vientos de ejemplo, se determina o identifica que la dirección y velocidad del viento predominante es desde el Sur-Oeste. Por lo tanto, para reducir ventajosamente las cargas de momentos y/o cargas de fatiga sobre la base de la torre, la estructura de la torre puede inclinarse hacia la dirección del viento predominante y/o velocidad del viento

basándose en al menos la rosa de los vientos determinada. Una reducción en las cargas de momentos y/o cargas de fatiga experimentadas por la base de la torre puede ser proporcional a la inclinación de la torre hacia la dirección del viento y/o velocidad del viento predominante. En este ejemplo, basándose en la rosa de los vientos determinada se determina que un ángulo de inclinación predeterminado para la inclinación de la torre es de 1 grado respecto a la posición vertical. Como se apreciará, el valor del ángulo de inclinación predeterminado para la inclinación puede depender del valor y/o tamaño de la dirección del viento y/o velocidad del viento predominante y la torre se inclinará hacia la dirección de los vientos predominantes en la localización de la turbina eólica. También se apreciará que el ángulo de inclinación predeterminado puede ser un valor establecido, por ejemplo 1 grado o 1,5 grados, y así sucesivamente, en donde la torre se inclina al valor establecido y el análisis de la rosa de los vientos puede usarse para determinar la dirección de la inclinación de la torre. El valor del ángulo de inclinación predeterminado para la inclinación de la torre puede variar desde 0,5 grados a 5 grados y preferentemente entre 1 grado y 2 grados.

La torre puede inclinarse hasta el ángulo de inclinación requerido mediante la instalación de una cimentación de torre sólida normal y la incorporación de pletinas en la base de la torre que se diseñan con la inclinación requerida. Esto permite ventajosamente a una torre de cimentación fija inclinarse hacia el viento predominante basándose en el análisis de la rosa de los vientos del emplazamiento o localización de la turbina eólica. Las pletinas de inclinación podrían usarse también sobre una turbina eólica flotante para inclinar la turbina eólica hacia la dirección de viento y/o velocidad predominante para una turbina eólica marina.

Mediante la inclinación de la torre de la turbina eólica hacia los vientos predominantes puede minimizarse la compensación de las cargas de momento y/o cargas de fatiga sobre la parte inferior de la torre. Como se muestra en la Figura 8, cuando la torre se inclina hacia la dirección del viento predominante, la envolvente de cargas de momentos de la parte inferior de la torre puede centrarse, lo que significa que pueden reducirse las cargas de momentos extremos y/o cargas de fatiga. Esto permite ventajosamente que la estructura de la torre se fabrique con menos resistencia y material conduciendo a una reducción en el coste de la torre. De modo similar, mediante la inclinación de la torre hacia el viento predominante, las cargas de momentos y/o cargas de fatiga efectivas se reducen y así la torre es capaz de manejar mayores cargas de momentos y/o cargas de fatiga que previamente, significando que la turbina eólica podría montarse en condiciones de viento que la torre no era previamente suficientemente resistente para manejar.

Cuando la torre se inclina hacia una dirección, entonces, si se encuentran fuertes vientos desde otra dirección, puede controlarse la turbina eólica para reducir la potencia de la turbina eólica para proteger a la turbina eólica de cargas excesivas.

Además de tener en cuenta el análisis de la rosa de los vientos para determinar el valor del ángulo de inclinación predeterminado para la inclinación y la dirección de inclinación de la torre, el análisis puede tener en cuenta adicionalmente la turbulencia del viento, presión de aire, temperaturas, o cualquier otra condición del viento.

En una realización adicional, para reducir los momentos sobre la torre 102, la turbina eólica puede aprovecharse de la gravedad para contrarrestar la fuerza de empuje sobre la turbina eólica, reduciendo de ese modo los momentos (por ejemplo las cargas de momento) y/o cargas de fatiga sobre la torre.

En este ejemplo, la torre puede fijarse o conectarse operativamente a un dispositivo que permita que la turbina eólica gire o se incline alrededor de uno o más ejes. Al permitir que la torre gire o se incline alrededor de uno o más ejes, la turbina eólica es capaz de inclinarse o reclinarse hacia el viento de modo que las fuerzas de la gravedad y las fuerzas de empuje de la turbina eólica estén en equilibrio, o equilibradas. En otras palabras, la turbina eólica se inclina o reclina hacia el viento usando la gravedad y se mantiene o se impide que caiga por la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica. De ese modo, las tensiones y/o cargas sobre la torre pueden reducirse mediante el equilibrado del centro de masas de la turbina eólica contra la fuerza del viento. Como se ha explicado anteriormente, mediante la reducción de las tensiones o cargas sobre la torre, entonces la torre puede diseñarse y fabricarse con menos material y resistencia reduciendo de ese modo los costes de la torre y por ello los costes de la turbina eólica.

El dispositivo puede ser cualquier dispositivo que permite a la turbina eólica inclinarse, por ejemplo, el dispositivo puede ser una articulación, una articulación esférica, una plataforma, material flexible, resorte o cualquier otro dispositivo adecuado.

En un ejemplo, mostrado en la Figura 2, la turbina eólica 201 comprende una torre 202 que se conecta a las cimentaciones 203 a través de una articulación 204. La articulación 204 en este ejemplo permite a la turbina eólica 201 inclinarse hacia adelante y atrás en la dirección proa-popa. Por ello, en este ejemplo la torre es capaz de girar o inclinarse alrededor de un eje.

Para tener la capacidad de utilizar una turbina eólica articulada, el control de la turbina eólica es un aspecto exigente e importante del ejemplo y realizaciones. La turbina eólica es capaz de girar o inclinarse alrededor de uno o más ejes y por lo tanto es esencial tener la capacidad de controlar la turbina eólica de modo que no gire o se incline demasiado y efectivamente caiga. La turbina eólica necesita estar controlada de modo que la fuerza de la gravedad y la fuerza de empuje que actúan sobre la turbina eólica sustancialmente se equilibren o estén en equilibrio. Como

se apreciará, el viento varía y no es consistente y de ese modo la turbina eólica necesita estar controlada para estabilizar la turbina eólica y mantener el balance o equilibrio dado que las fuerzas de empuje que actúan sobre la turbina eólica pueden variar.

5 Una turbina eólica comprende típicamente mecanismos para alterar o cambiar los parámetros de operación de la turbina eólica. Por ejemplo, una turbina eólica es capaz de alterar el paso de las palas de turbina través de un sistema de control de paso, el par del generador puede alterarse o cambiarse por un controlador de par del generador y la góndola es capaz de orientarse a través de un sistema de control de guiñada. La turbina eólica puede incluir otros mecanismos para alterar los parámetros de operación de la turbina eólica.

10 El control de la turbina eólica puede basarse en, al menos, la velocidad del viento en la turbina eólica y/o aguas arriba de la turbina eólica. La velocidad del viento puede determinarse o estimarse a partir de sensores tales como un dispositivo de Detección y Localización por Luz (LiDAR), un sensor anemómetro y otros similares, localizados en o separados de la turbina eólica. La velocidad del viento puede deducirse o estimarse alternativamente basándose en, por ejemplo, la potencia eléctrica que se está generando, el ángulo de paso de las palas de turbina y otros similares.

15 Para controlar la turbina eólica en las realizaciones de la presente invención, un controlador altera el (los) parámetro(s) de operación de la turbina eólica de modo que se mantenga la estabilidad de la turbina eólica y mantenga la turbina eólica en equilibrio o equilibrada entre la fuerza de empuje y la gravedad. El controlador puede determinar un ángulo de inclinación para la turbina eólica y alterar (o iniciar la alteración de) los parámetros de operación de la turbina eólica basándose en el ángulo de inclinación determinado. El ángulo de inclinación puede determinarse a partir de una tabla de búsqueda basándose en, por ejemplo, la velocidad del viento, o el controlador puede calcular el ángulo de inclinación en tiempo real basándose en, por ejemplo, la velocidad del viento.

20 Una vez se ha determinado el ángulo de inclinación requerido, el controlador puede iniciar un cambio en los parámetros de operación de modo que la turbina eólica se incline hacia el ángulo de inclinación requerido o se mantenga en el ángulo de inclinación deseado. Por ejemplo, el controlador puede determinar un ángulo de paso para las palas de turbina, tanto individual como colectivamente, e iniciar a través de un sistema de control de paso el cambio en el ángulo de paso de las palas de turbina. El controlador puede determinar un par del generador y/o par del rotor e iniciar la alteración del par respectivo.

25 El controlador puede determinar o identificar el ángulo de inclinación actual de la turbina eólica. El controlador puede seguir el ángulo de inclinación de la turbina eólica y mantener un registro del ángulo de inclinación de la turbina eólica. El controlador puede determinar el ángulo de inclinación actual de la turbina eólica basándose en, por ejemplo, sensores en la turbina eólica, en particular en la góndola. Los sensores pueden incluir inclinómetros, acelerómetros o cualquier otro sensor adecuado para determinar el ángulo de inclinación de la turbina eólica. Alternativamente, o adicionalmente, puede haber sensores separados de la turbina eólica que pueden identificar el ángulo de inclinación actual de la turbina eólica y proporcionar al controlador el ángulo de inclinación actual de la turbina eólica.

30 Si el ángulo de inclinación actual es conocido, entonces el controlador puede determinar adicionalmente una diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación requerido. Los parámetros de operación pueden alterarse entonces para asegurar que la turbina eólica se mueve desde el ángulo de inclinación actual al ángulo de inclinación requerido y/o se mantiene en el ángulo de inclinación requerido.

35 Puede ser necesario también considerar el control de la turbina eólica durante la operación de la turbina eólica. En particular, puede considerarse que, en funcionamiento, la turbina eólica pasa a través de tres zonas de operación durante las que el control de la turbina eólica puede variar.

40 La primera zona es cuando la turbina eólica se somete a bajas velocidades de viento, por debajo de la denominada velocidad del viento nominal para el diseño de la turbina eólica. En esta zona de baja velocidad del viento debería maximizarse la potencia producida o generada por la turbina eólica mientras se mantiene la estabilidad de la turbina eólica articulada.

45 La segunda zona es una zona de transición entre una zona de baja velocidad del viento y una zona de velocidad del viento nominal. En la zona de transición, la velocidad del viento se incrementa desde velocidades del viento por debajo de la nominal a la nominal o por encima de la nominal.

50 La tercera zona es la zona de velocidad del viento por encima de la nominal en donde la potencia producida o generada debe limitarse a la potencia nominal por el diseño de la turbina eólica.

55 En la primera zona, la turbina eólica se controla para maximizar la producción de energía generada y para mantener estable la turbina eólica, en otras palabras mantener el balance o equilibrio entre la fuerza de empuje y la gravedad. En la primera zona, la velocidad del viento se incrementa desde la velocidad de arranque en todo el intervalo hasta aproximadamente la velocidad del viento nominal para la turbina eólica dada. Para maximizar la energía eléctrica

generada puede mantenerse el ángulo de paso de las palas a sustancialmente 0 grados. La velocidad del rotor es proporcional a la velocidad del viento y de ese modo cuando la velocidad del viento se incrementa así lo hace la velocidad del rotor de la turbina eólica. El par del generador se incrementa así proporcional al cuadrado de la velocidad del rotor.

5 En consecuencia, cuando la velocidad del viento se incrementa y por lo tanto también se incrementa la velocidad del rotor en esta primera zona, la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica también se incrementa. Se determina por el controlador el ángulo de inclinación requerido (por ejemplo a partir de una tabla de búsqueda, calculado en tiempo real, etc.) y se controla la turbina eólica mediante la alteración de los parámetros de operación para obtener o mantener la turbina eólica con el ángulo requerido. En esta primera zona el controlador puede alterar el par del generador y/o el ángulo de paso de las palas de turbina para obtener o mantener el ángulo de inclinación requerido.

15 En la segunda zona, las velocidades del viento se aproximan y están sustancialmente próximas a la velocidad del viento nominal para la turbina eólica dada. Esta zona se considera como la transición entre velocidades del viento por debajo de la nominal y velocidades del viento nominales (y por encima). Durante esta zona la operación de la turbina eólica y los puntos de operación cambian desde un enfoque en la generación de la máxima producción de energía eléctrica posible a mantener la máxima producción de energía eléctrica posible para una turbina eólica dada.

20 En la segunda zona, el controlador determina de nuevo el ángulo de inclinación requerido de la turbina eólica y altera o inicia un cambio en los parámetros de operación de la turbina eólica. Por ejemplo, el controlador puede incrementar el ángulo de paso de las palas de turbina para obtener o mantener el ángulo de inclinación requerido de modo que la turbina eólica pueda mantenerse establemente en equilibrio entre la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica y la gravedad. Sin embargo, el incremento en el ángulo de paso significa que la turbina eólica ya no está generando la máxima producción de energía eléctrica permisible y por lo tanto debería minimizarse el tamaño de la segunda zona. El controlador también puede alterar el par del generador y/o la guiñada de la góndola o alterar cualquier otro parámetro de operación de la turbina eólica para obtener o mantener el ángulo de inclinación requerido o determinado.

30 En la tercera zona, donde las velocidades del viento están en o por encima de las velocidades de viento nominales, la turbina eólica se controla para mantener la producción de energía eléctrica en el máximo permisible. Típicamente, el controlador incrementa el ángulo de paso de las palas de turbina cuando se incrementa la velocidad del viento para mantener la velocidad del rotor constante en la máxima permisible, lo que mantiene el par del generador constante de modo que se mantiene una producción de energía eléctrica constante. Durante esta zona, se determina el ángulo de inclinación requerido y se alteran los parámetros de operación de la turbina eólica para obtener o mantener el ángulo de inclinación determinado requerido mediante, por ejemplo, el incremento del ángulo de paso de las palas de turbina.

40 En consecuencia, el ejemplo descrito en el presente documento anteriormente muestra que puede controlarse una turbina articulada para mantener la estabilidad de la turbina eólica y permitir que la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica se equilibre por la gravedad que también actúa sobre la turbina eólica. El controlador puede utilizar el controlador de par del generador y/o el sistema de control de paso para regular el ángulo de inclinación de la turbina eólica.

45 En el ejemplo anterior, la turbina eólica incluía una articulación entre la torre y las cimentaciones para permitir a la turbina eólica inclinarse o reclinarse en direcciones adelante y atrás, en otras palabras, girar alrededor de un eje. Sin embargo, la base de la torre puede someterse a momentos, fuerzas, cargas o tensiones en otras direcciones y alrededor de ejes adicionales tales como laterales. De ese modo, puede ser adicionalmente beneficioso permitir que la turbina eólica gire o se incline alrededor de más de un eje de modo que reduzca los momentos sobre la torre significando que el coste de la torre puede reducirse adicionalmente.

55 En el siguiente ejemplo, explicado con referencia a la Figura 3, la turbina eólica 301 incluye una torre 302, una articulación esférica 303 que conecta la torre a las cimentaciones 304. Se fija una góndola 305 a la torre 302 y el rotor 306 se fija a la góndola 305 donde una o más palas de turbina 307 se fijan al rotor 306.

La articulación esférica 303 permite que la turbina eólica sea capaz de girar en múltiples ejes. En lugar de una articulación esférica 303 puede utilizarse cualquier otro dispositivo que permita a la turbina girar alrededor de más de un eje, por ejemplo, un resorte, dos o más articulaciones, una articulación que pueda funcionar en más de un eje, y otros similares.

60 Así, además del primer ejemplo (en donde el controlador altera los parámetros de operación de la turbina eólica para inclinar la turbina eólica para mantener el balance o equilibrio entre la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica y la gravedad en la dirección adelante y atrás), el controlador puede controlar adicionalmente la inclinación o giro lateral mediante la alteración del par del rotor y/o par del generador. El par del generador puede traducirse a través de la estructura de la góndola en un movimiento lateral de la torre que puede usarse para equilibrar los laterales de la torre. Adicionalmente, en combinación con el control del ángulo de paso, puede usarse para equilibrar

la turbina eólica contra la fuerza de empuje en múltiples direcciones. Alternativa o adicionalmente, el controlador puede cambiar o alterar adicionalmente la guiñada de la góndola a través de un sistema de control de la guiñada para obtener la inclinación requerida en las múltiples direcciones alrededor del eje de giro del dispositivo articulado.

5 En los ejemplos y realizaciones descritas en el presente documento anteriormente, los parámetros de operación de la turbina eólica se alteran o cambian para inclinar la turbina eólica de modo que la fuerza de empuje y la gravedad que actúan sobre la turbina eólica se equilibren. El ángulo de inclinación requerido para la turbina eólica puede determinarse a partir de una tabla de búsqueda basada en uno o más de entre la fuerza de empuje determinada que actúa sobre la turbina eólica, velocidad del rotor, ángulo de paso de las palas de turbina, par del generador,  
10 velocidad del viento (real o estimada), cizalladura del viento (real o estimada) y dirección del viento. El ángulo de inclinación requerido puede alternativa o adicionalmente calcularse o determinarse en tiempo real.

El controlador puede iniciar los sistemas respectivos o correspondientes dependiendo del parámetro de operación que necesite ser alterado o cambiado para mantener el equilibrio entre la fuerza de empuje y la gravedad. Por  
15 ejemplo, el sistema de control de paso para alterar el ángulo de paso de las palas de turbina.

El ángulo de inclinación de la turbina eólica puede seguirse o identificarse de modo que pueda determinarse la diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación requerido. Pueden alterarse entonces los parámetros de operación de la turbina eólica en una cantidad necesaria para alcanzar el ángulo de inclinación deseado a partir del ángulo de inclinación actual. De modo similar, la diferencia entre el ángulo de inclinación actual y el ángulo de inclinación requerido puede convertirse en, o determinarse como, una diferencia en los parámetros de operación, por ejemplo la diferencia entre el ángulo de paso actual de las palas de turbina y el ángulo de paso requerido. Por ejemplo, si el ángulo de inclinación determinado es, digamos, 4 grados respecto a la vertical en la dirección hacia delante, entonces el ángulo de inclinación actual puede supervisarse, seguirse o medirse de modo  
20 que los parámetros de operación pueden alterarse para mantener la turbina eólica en 4 grados en este ejemplo.

De ese modo, el controlador puede seguir y mantener un registro de los ángulos de inclinación. El controlador puede también seguir o registrar fuerzas de empuje, ángulos de paso, par del generador, par del rotor, velocidades del viento, cizallamiento del viento, y otros similares, de modo que sea capaz de mantener la turbina eólica en el ángulo de inclinación determinado o requerido.  
30

El controlador puede también tener en cuenta el rendimiento de la turbina eólica cuando determina el cambio en los parámetros de operación para inclinar la turbina eólica en el ángulo de inclinación apropiado. Por lo tanto, el controlador puede basar adicionalmente la determinación del ángulo de inclinación y/o la alteración de los parámetros de operación en las condiciones que afectan a la turbina eólica y/o en las condiciones de operación de la turbina eólica y/o en la producción de energía eléctrica requerida. En otras palabras, puede ser adecuado más de un ángulo de inclinación para el equilibrado de la turbina eólica entre la fuerza de empuje y la gravedad y por lo tanto el controlador puede determinar el ángulo de inclinación que proporciona la mejor u óptima generación de energía eléctrica u otros factores para la turbina eólica. De ese modo, en la determinación del ángulo de inclinación y/o el cambio en los parámetros de operación de la turbina eólica, el controlador puede tener en cuenta las condiciones óptimas para la turbina eólica.  
35 40

Las realizaciones y ejemplos descritos en el presente documento anteriormente pueden incluir adicionalmente un supervisor para incrementar la estabilidad de la turbina eólica. La turbina eólica puede caer si pierde el equilibrio entre la fuerza de empuje y la gravedad. Una reducción súbita en la velocidad del viento significa una reducción en la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica. El controlador intenta compensar la reducción en la velocidad del viento disminuyendo el ángulo de paso de las palas de turbina para incrementar la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica. Sin embargo, puede ser beneficioso asegurar que el control de la turbina eólica no hace que la turbina eólica oscile adelante y atrás (o en cualquier otra dirección alrededor de los ejes de giro). Por lo tanto, puede implementarse un supervisor para supervisar el control de la turbina eólica para impedir que la turbina eólica oscile o se incline demasiado en cualquier dirección e incrementar la estabilidad de la turbina eólica. El supervisor puede, por ejemplo, limitar el ángulo de paso de las palas de turbina, puede limitar el par del rotor y/o el par del generador.  
45 50

55 En consecuencia, en los ejemplos anteriores, la turbina eólica puede controlarse para inclinar o girar en la dirección adelante/atrás y/o en la dirección lateral. La turbina eólica puede controlarse independientemente en esas direcciones o el control de la turbina eólica puede combinarse de modo que sea capaz de controlar la turbina eólica no solamente en la dirección adelante/atrás y/o la dirección lateral sino en más direcciones, tales como la diagonal.

60 El controlador puede determinar constantemente el ángulo de inclinación requerido y alterar los parámetros de operación en consecuencia. Alternativamente, el controlador puede determinar el ángulo de inclinación requerido a cualquier frecuencia adecuada o período de tiempo con la finalidad de la invención de modo que mantenga la turbina eólica equilibrada.

65 En el periodo entre determinaciones subsiguientes del ángulo de inclinación requerido, el controlador puede controlar u operar la turbina eólica de modo que mantenga el último ángulo de inclinación determinado. Por lo tanto,

el controlador puede supervisar o seguir el ángulo de inclinación actual de la turbina eólica y puede alterar los parámetros de operación de la turbina eólica si el ángulo de inclinación actual varía respecto al último ángulo de inclinación determinado y antes de que se determine un nuevo ángulo de inclinación para mantener la turbina eólica en el último ángulo de inclinación determinado.

5 En los ejemplos y realizaciones anteriores, el controlador puede alterar adicionalmente los parámetros de operación de la turbina eólica para girar u operar la turbina eólica efectivamente como un ventilador. En particular, la turbina eólica puede controlarse en un modo motor de modo que pueda utilizarse para incrementar adicionalmente la estabilidad de la turbina eólica. El par del generador puede ser bidireccional y tener tanto par positivo como negativo.  
10 En el modo motor, la turbina eólica puede consumir energía eléctrica en lugar de generar energía eléctrica pero el modo motor puede ser útil para maniobrar la turbina eólica al ángulo de inclinación requerido o usarse como una ayuda para impedir que la turbina eólica caiga o como una ayuda para estabilizar la turbina eólica.

15 El controlador puede determinar o calcular la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica a través de una variedad de medios y sensores. Por ejemplo, la fuerza de empuje puede determinarse basándose en el ángulo de paso de las palas de turbina, la velocidad del rotor y la velocidad del viento. Cuando la velocidad del viento varía, entonces el efecto de la fuerza de empuje que actúa sobre la turbina eólica puede también variar. Además, los cambios en el ángulo de paso pueden afectar o alterar el efecto de la fuerza de empuje sobre la turbina eólica.

20 En consecuencia, los ejemplos y realizaciones anteriores muestran que la turbina eólica puede controlarse de modo que se incline o gire de forma que la turbina eólica pueda mantenerse establemente en equilibrio entre la fuerza de empuje y la gravedad que actúan sobre la turbina eólica.

25 Para permitir que la turbina eólica sea controlada en esta forma, la turbina eólica necesita ser capaz de girar o inclinarse alrededor de uno o más ejes. La torre de la turbina eólica se conecta operativamente a un dispositivo que permite que la turbina eólica gire o se incline alrededor de uno o más ejes. Por ejemplo, el dispositivo puede ser una articulación de un eje, una articulación de dos o más ejes, una articulación esférica, un resorte, una plataforma, una torre flexible, un sistema de cable y polea, o cualquier otro dispositivo que permita que la turbina eólica gire o se incline alrededor de uno o más ejes.  
30

En un ejemplo, que no es parte de la invención y se proporciona solamente por referencia, si el dispositivo es una plataforma (por ejemplo, una plataforma flotante o una plataforma terrestre) el controlador puede alterar adicionalmente o iniciar la alteración de la plataforma como uno de los parámetros de operación de la turbina eólica, tanto independientemente como en combinación con los otros parámetros de operación descritos en el presente documento anteriormente. Por ejemplo, si la plataforma incluye pistones hidráulicos, entonces el controlador puede controlar o iniciar el control de la plataforma hidráulica para inclinar la turbina eólica.  
35

Como se muestra en la Figura 5, proporcionada solamente por referencia, el grado de libertad para girar o inclinarse puede proporcionarse por una plataforma flotante.  
40

La Figura 5a muestra una turbina eólica 501 montada sobre una plataforma flotante 502 de tipo de boya simple. En este ejemplo, la plataforma flotante de boya incluye dos impulsores 503 que pueden usarse para mover e inclinar la turbina eólica 501.

45 La Figura 5b muestra una turbina eólica 504 montada sobre una plataforma flotante 505 de boya simple en donde el lastre, en este ejemplo agua, puede bombearse o drenarse para cambiar el ángulo de inclinación de la turbina eólica 504. Como se apreciará, el sistema de lastre activo puede incorporar un sistema cerrado con diferentes cámaras para controlar la inclinación de la turbina eólica. El sistema de lastre puede ser un sistema de lastre abierto que use el agua de la masa de agua en la que está localizada la plataforma de boya.  
50

También, en la Figura 5, se muestra la plataforma flotante como una plataforma de tipo de boya simple, sin embargo, como se apreciará, puede haber cualquier número de boyas o la turbina eólica puede montarse sobre una plataforma soportada por dos o más tanques de lastre en donde el lastre puede moverse activamente entre los tanques de lastre para inclinar la turbina eólica.  
55

La turbina eólica puede combinar dispositivos para controlar el giro o inclinación de la turbina eólica y para mantener establemente el equilibrio entre la fuerza de empuje y la gravedad que actúan sobre la turbina eólica. Por ejemplo, la turbina eólica puede incluir una articulación que conecte operativamente la torre de la turbina eólica a una plataforma.  
60

La turbina eólica puede incluir también uno o más dispositivos de seguridad tal como se muestra en la Figura 4.

65 Por ejemplo, la Figura 4a muestra una turbina eólica 401 articulada que incluye una falda mecánica 402. En la Figura 4a, la falda mecánica 402 tiene una forma triangular o piramidal, sin embargo, como se apreciará, la falda mecánica 402 puede tener cualquier forma adecuada. La falda mecánica 402 puede ser un bastidor o una falda sólida o una combinación de los mismos. En este ejemplo, la falda mecánica 402 es capaz de girar alrededor de la

conexión a la torre de la turbina eólica 401 o puede fijarse a la turbina eólica 401 de modo que la turbina eólica no quede obstaculizada cuando se inclina o rechina en un ángulo más bajo que un límite predefinido. Si la turbina eólica 401 intenta reclinarse o inclinarse más allá de un límite predefinido, entonces la falda mecánica 402 se pone en contacto con el terreno impidiendo que la turbina eólica se recline o incline más que el límite predefinido impidiendo de ese modo que la turbina eólica caiga.

Se muestra otro ejemplo en la Figura 4b, en el que la turbina eólica 401 articulada se fija a una plataforma deslizante 403. La plataforma deslizante 403 puede conectarse operativamente a un sistema de poleas 404 o un dispositivo similar que sea capaz de deslizar la plataforma deslizante 403 atrás y adelante o en cualquier otra dirección. Por lo tanto, si la turbina eólica 401 se reclina o inclina más allá de un límite predefinido, entonces puede activarse la plataforma deslizante 403 a través del sistema de poleas 404 para impedir que la turbina eólica caiga.

La Figura 4c muestra un ejemplo adicional en el que la turbina eólica 401 articulada se conecta a un sistema de poleas 405 de modo que si la turbina eólica se reclina o inclina más allá de un límite predefinido, entonces puede activarse el sistema de poleas 405 para tirar o empujar, en una o más direcciones, para impedir que la turbina eólica caiga o sobrepase el ángulo de inclinación predefinido. El sistema de poleas 405 puede ser un sistema hidráulico, un sistema de cable o cualquier otro sistema de poleas adecuado para su uso como el sistema de seguridad.

En la Figura 4d, la turbina eólica 401 articulada se conecta a una plataforma 406 que está soportada por un trípode de pistones o columnas hidráulicas. Por lo tanto, si la turbina eólica 401 se reclina o inclina más allá de un límite predefinido, entonces puede activarse el trípode 406 de modo que se impida que la turbina eólica 401 caiga o se incline más allá del límite predefinido.

Se muestra otro ejemplo en la Figura 4e, en el que la turbina eólica 401 articulada se cuelga invertida. La turbina eólica 401 articulada puede conectarse a un bastidor y al colgar invertida se impedirá que caiga.

En la Figura 4f, la turbina eólica 401 articulada incluye una góndola 407 móvil de modo que si la turbina eólica intenta inclinarse más allá de un límite predefinido, entonces puede moverse la góndola 407 para contrarrestar la inclinación e impedir que la turbina eólica 401 caiga.

En la Figura 4g, la turbina eólica 401 articulada se conecta a dos o más cables 408 que pueden extenderse o retraerse a través de, por ejemplo, un sistema de poleas 409. Por lo tanto, mientras la turbina eólica está dentro del límite del ángulo de inclinación predefinido, la turbina eólica es capaz de inclinarse, sin embargo los cables 408 y el sistema de poleas 409 pueden utilizarse para impedir que la turbina eólica 401 se incline más allá del límite predefinido.

En la Figura 4h, la góndola de la turbina eólica se monta sobre una torre flexible 410 que es capaz de doblarse o moverse. La cantidad de flexibilidad y elasticidad significa que la turbina eólica es incapaz de caer pero proporciona suficiente libertad para inclinar o girar. La torre flexible puede ser el dispositivo que permita a la turbina eólica inclinarse.

Se muestran en la Figura 4 varios diseños de turbinas eólicas que permiten a la turbina eólica inclinarse o girar alrededor de uno o más ejes y también muestran uno o más dispositivos de seguridad que pueden impedir que la turbina eólica caiga. Uno o más de los dispositivos de seguridad pueden combinarse con uno o más de los diseños de turbina eólica mostrados o descritos en el presente documento anteriormente.

En turbinas eólicas fijas convencionales el mayor esfuerzo procede del momento en la base de la torre debido a las fuerzas de empuje que actúan sobre la torre desde el viento. Ventajosamente, en la turbina eólica que es capaz de girar o inclinarse alrededor de uno o más ejes, el esfuerzo provocado por el momento en la base de la torre se niega efectiva y sustancialmente. En consecuencia, la implementación de una articulación (o dispositivo similar) proporciona una reducción significativa en los esfuerzos de los momentos sobre la torre, lo que permite a la torre diseñarse con un diámetro más pequeño dado que se reducen las cargas y esfuerzos que actúan sobre la torre.

Como se ha descrito en el presente documento anteriormente, el viento actúa con una fuerza sobre el plano del rotor que puede dividirse en dos componentes perpendiculares. Un componente de la fuerza provoca que el rotor gire, denominado el par del rotor, el otro componente empuja a la turbina eólica hacia atrás, denominada la fuerza de empuje. La fuerza de empuje añade una carga sobre la estructura de la turbina eólica. La estructura debe ser capaz de soportar esta fuerza, lo que eleva los requisitos para la resistencia de la estructura y por ello el coste. El tener una articulación o junta en la parte inferior de la torre (que conecta operativamente la torre con la cimentación) le permite a la turbina reclinarse contra el viento. El reclinado de la turbina permite que la fuerza de gravitación actúe en oposición a la fuerza de empuje, por lo que la torre de la turbina puede liberarse de los esfuerzos mecánicos inducidos por el empuje y reducir los momentos en la base de la torre y/o cimentaciones. Las estrategias de control descritas en el presente documento muestran que mediante la manipulación de los parámetros de operación de la turbina eólica, la torre puede equilibrarse contra el viento mientras mantiene una producción de energía óptima.

5 En un ejemplo adicional, los ejemplos de inclinación fija descritos en el presente documento anteriormente pueden combinarse con ejemplos que se refieren a que la torre se fije a un dispositivo que permita a la torre girar o inclinarse alrededor de uno o más ejes. Por ejemplo, el dispositivo puede fijarse (por ejemplo, por medio de un pasador, un freno, u otra disposición de fijación) para permitir que la torre se incline hacia el viento predominante que se ha determinado o identificado a partir de la rosa de los vientos y el análisis del emplazamiento.

10 La torre de la turbina eólica puede mantenerse en una inclinación fija durante un período de tiempo, o bajo ciertas condiciones del viento y/o condiciones de operación. En otros momentos o bajo otras condiciones del viento y/o condiciones de operación, la disposición fija puede liberarse permitiendo a la torre girar o inclinarse alrededor de uno o más ejes. Al combinar las realizaciones puede conseguirse un control eficiente y flexible de la turbina eólica.

15 Aunque se han mostrado y descrito realizaciones de la invención, se entenderá que dichas realizaciones se describen solamente a modo de ejemplo. Se les ocurrirán a los expertos en la materia numerosas variaciones, cambios y sustituciones sin apartarse del alcance de la presente invención tal como se define por las reivindicaciones adjuntas. En consecuencia, se pretende que las reivindicaciones que siguen cubran todas esas variaciones o equivalentes tal como caen dentro del espíritu y el alcance de la invención.

**REIVINDICACIONES**

1. Una turbina eólica (101) que comprende:

5 una cimentación (103) en la que dicha cimentación (103) es una cimentación fija; y  
 una torre (102) conectada a dicha cimentación (103) en la que dicha torre (102) está inclinada respecto a una  
 posición vertical para reducir la carga sobre dicha torre (102);  
 en la que dicha torre (102) está inclinada con un ángulo de inclinación predeterminado hacia una dirección de  
 viento predominante; y  
 10 caracterizada por que dicho ángulo de inclinación predeterminado se determina basándose en un análisis de las  
 condiciones del viento en una localización de dicha turbina eólica (101).

2. La turbina eólica (101) de acuerdo con la reivindicación 1, en la que dicha torre (102) se inclina de modo fijo a  
 dicho ángulo de inclinación predeterminado de modo que dicha torre (102) se incline permanentemente respecto a  
 15 dicha posición vertical.

3. La turbina eólica (101) de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende adicionalmente:

20 un dispositivo operativamente conectado a dicha torre (102), en la que dicho dispositivo permite a dicha torre  
 (102) inclinarse alrededor de uno o más ejes y dicha torre (102) se conecta a dicha cimentación (103) mediante  
 dicho dispositivo.

4. La turbina eólica (101) de acuerdo con la reivindicación 3 en la que dicho dispositivo es uno o más de entre una  
 articulación, una plataforma, un elemento flexible, una junta, y una articulación esférica.

5. La turbina eólica de acuerdo con las reivindicaciones 3 o 4 que comprende adicionalmente:

30 uno o más dispositivos de seguridad, en la que dicho dispositivo de seguridad impide que dicha turbina eólica se  
 incline más allá de un ángulo de inclinación predeterminado.

6. La turbina eólica (101) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, que comprende  
 adicionalmente:

35 un controlador adaptado para determinar un ángulo de inclinación para dicha turbina eólica (101); y  
 dicho controlador está adicionalmente adaptado para alterar un parámetro de operación de dicha turbina eólica  
 (101) de modo que dicha turbina eólica se incline a dicho ángulo de inclinación determinado en el que dicha  
 turbina eólica (101) está equilibrada entre una fuerza de empuje que actúa sobre dicha turbina eólica (101) y la  
 gravedad que actúa sobre dicha turbina eólica (101).

40 7. La turbina eólica (101) de acuerdo con la reivindicación 6 en la que dicho controlador está adicionalmente  
 adaptado para determinar un ángulo de inclinación óptimo en el que dicho ángulo de inclinación óptimo proporciona  
 una producción de energía eléctrica óptima mediante dicha turbina eólica (101).

45 8. La turbina eólica (101) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 6 o 7 en la que dicho controlador  
 está adicionalmente adaptado para identificar dicho ángulo de inclinación a partir de una tabla de búsqueda; o  
 calcular dicho ángulo de inclinación en tiempo real.

50 9. La turbina eólica (101) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 8 en la que dicho controlador  
 está adicionalmente adaptado para determinar un ángulo de paso para una o más palas (106) de turbina de dicha  
 turbina eólica (101) basándose en dicho ángulo de inclinación determinado; y/o determinar un par del generador  
 para un generador de dicha turbina eólica (101) basándose en dicho ángulo de inclinación determinado.

10. La turbina eólica (101) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, en la que dicho controlador  
 está adicionalmente adaptado para:

55 identificar un ángulo de inclinación actual de dicha turbina eólica (101);  
 determinar una diferencia entre dicho ángulo de inclinación actual y dicho ángulo de inclinación determinado; y  
 alterar dichos parámetros de operación de dicha turbina eólica (101) basándose en dicha diferencia determinada.

60 11. Un método que comprende:

inclinar una torre (102) de una turbina eólica (101), en el que dicha torre se conecta a una cimentación fija, de  
 modo que dicha torre (102) se incline respecto a una posición vertical para reducir cargas sobre dicha torre;  
 comprendiendo adicionalmente el método:  
 65 determinar una dirección del viento predominante;  
 inclinar dicha torre (102) en un ángulo de inclinación predeterminado hacia dicha dirección del viento

predominante; y determinar dicho ángulo de inclinación predeterminado basándose en un análisis de las condiciones del viento en una localización de dicha turbina eólica (101).

- 5 12. El método de acuerdo con la reivindicación 11, en el que dicha torre (102) se inclina de modo fijo a dicho ángulo de inclinación predeterminado de modo que dicha torre (102) se inclina permanentemente respecto a una posición vertical.
13. El método de acuerdo con la reivindicación 11, que comprende adicionalmente:
- 10 determinar un ángulo de inclinación para dicha turbina eólica (101); y  
alterar un parámetro de operación de dicha turbina eólica (101) de modo que dicha turbina eólica (101) se incline a dicho ángulo de inclinación determinado y dicha turbina eólica (101) se equilibre entre una fuerza de empuje que actúa sobre dicha turbina eólica y la gravedad que actúa sobre dicha turbina eólica.
- 15 14. El método de acuerdo con la reivindicación 13 en el que la determinación de dicho ángulo de inclinación comprende adicionalmente:
- determinar un ángulo de inclinación óptimo en el que dicho ángulo de inclinación óptimo proporciona una  
20 producción de energía eléctrica óptima mediante dicha turbina eólica (101).
15. El método de acuerdo con las reivindicaciones 13 o 14 en el que la determinación de dicho ángulo de inclinación comprende:
- 25 identificar dicho ángulo de inclinación a partir de una tabla de búsqueda; o  
calcular dicho ángulo de inclinación en tiempo real.
16. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 15 en el que la alteración de dicho parámetro de operación de dicha turbina eólica comprende:
- 30 determinar un ángulo de paso para una o más palas (106) de turbina de dicha turbina eólica (101) basándose en dicho ángulo de inclinación determinado; y/o  
determinar un par del generador para un generador de dicha turbina eólica (101) basándose en dicho ángulo de inclinación determinado.
- 35 17. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 16 que comprende adicionalmente:
- identificar un ángulo de inclinación actual de dicha turbina eólica;  
determinar una diferencia entre dicho ángulo de inclinación actual y dicho ángulo de inclinación determinado; y  
40 dicha alteración de dichos parámetros de operación de dicha turbina eólica (101) se basa en dicha diferencia determinada.

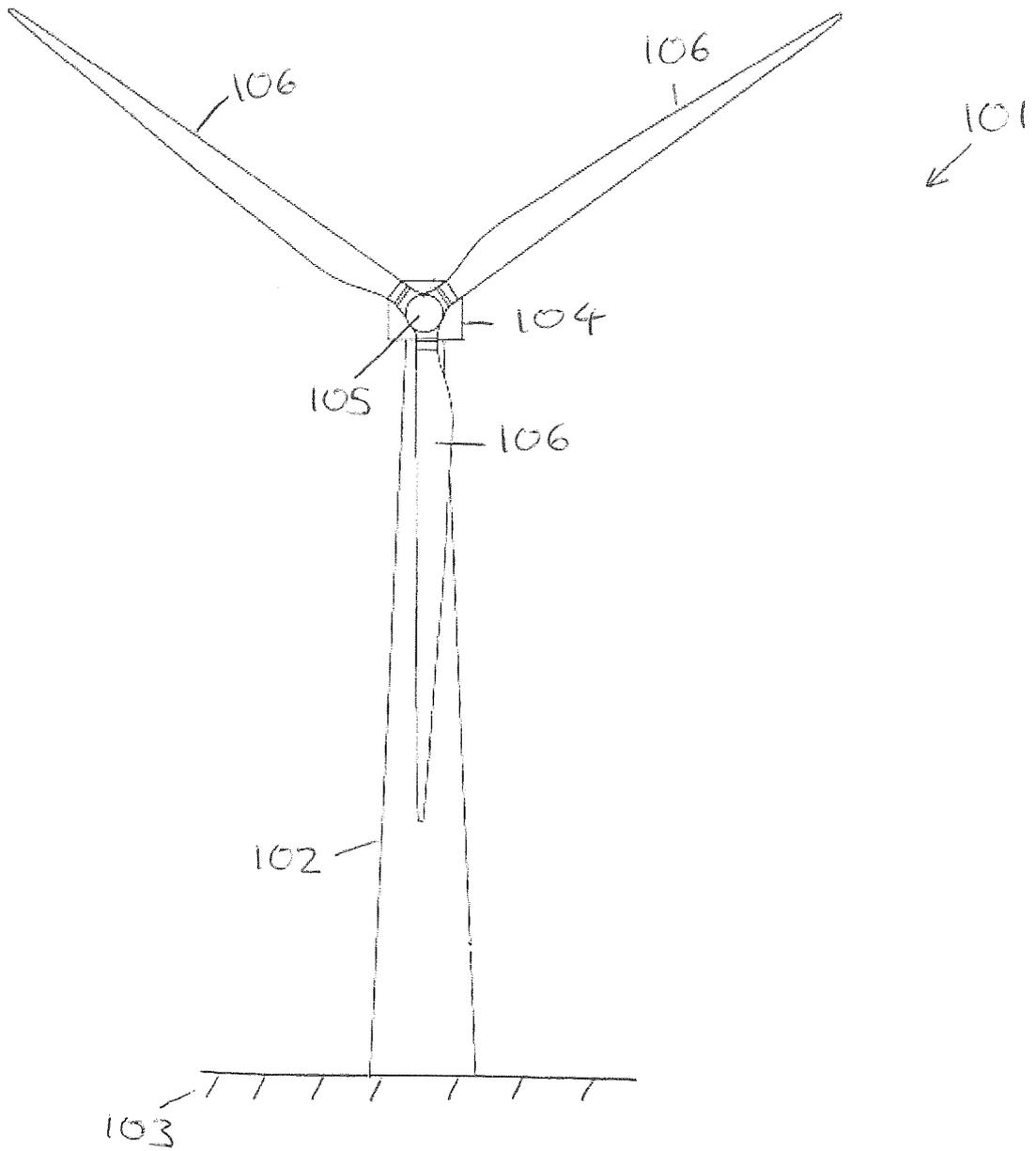


Figura 1

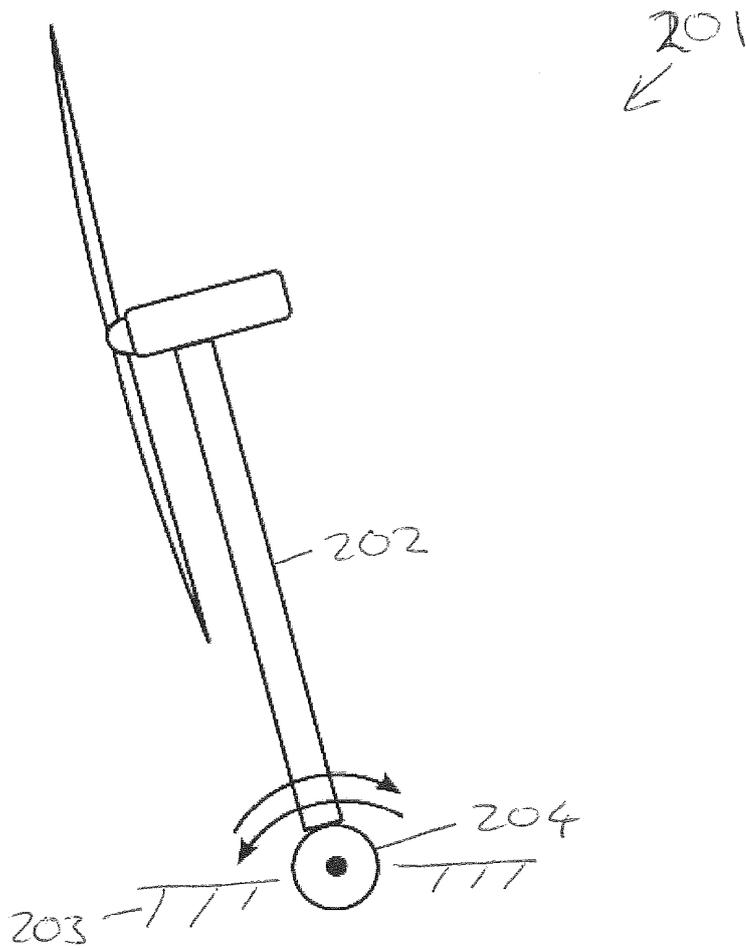


Figura 2

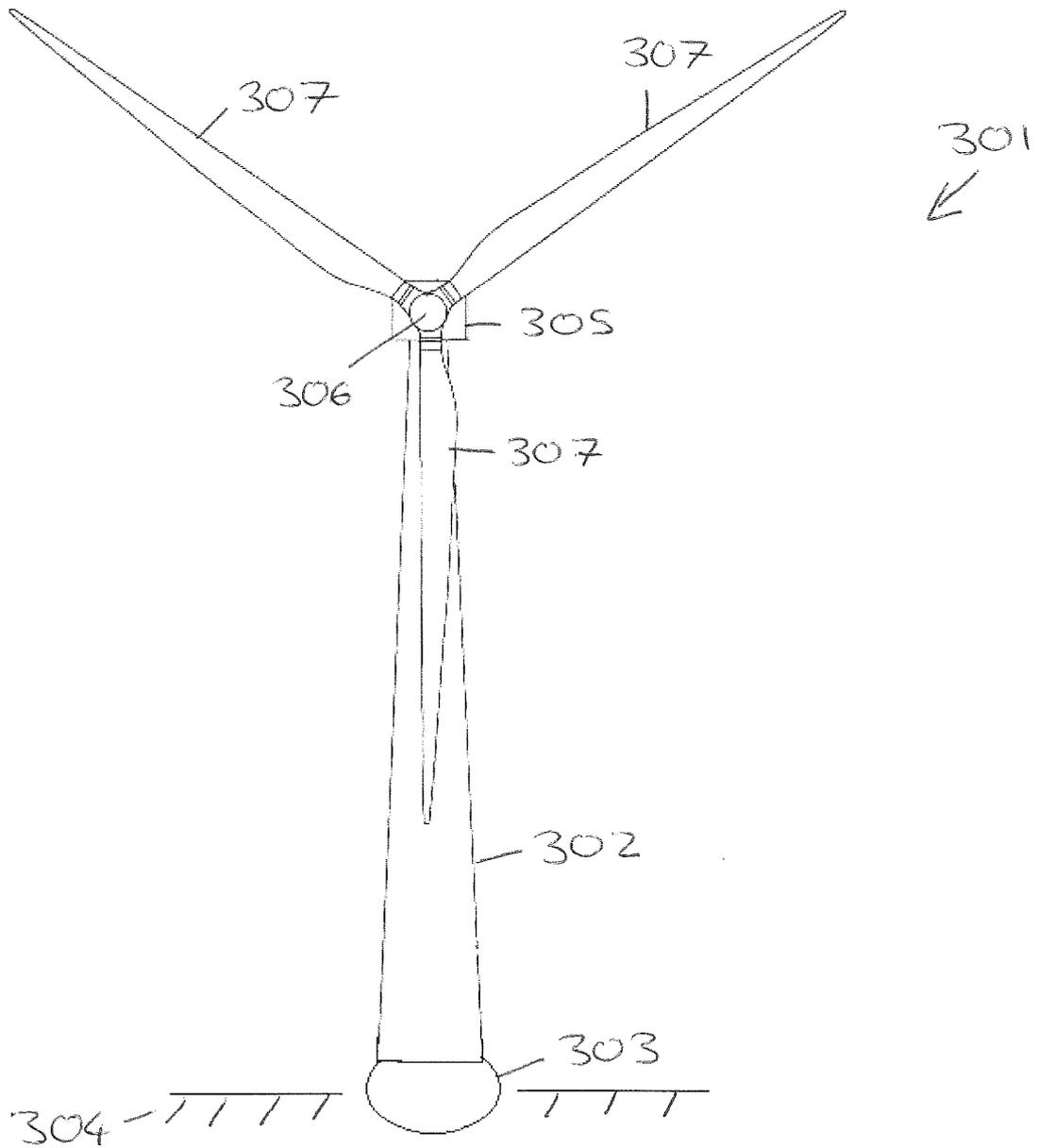


Figura 3

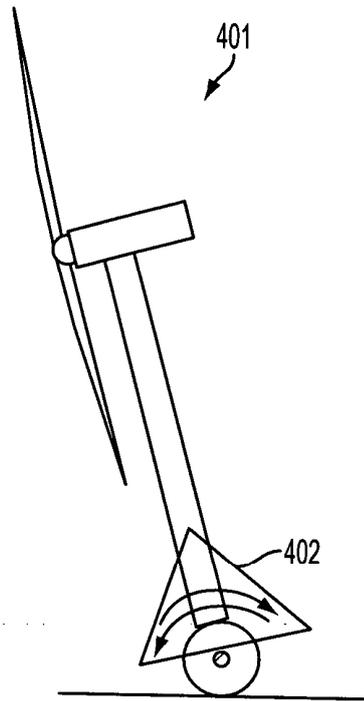


FIG. 4a

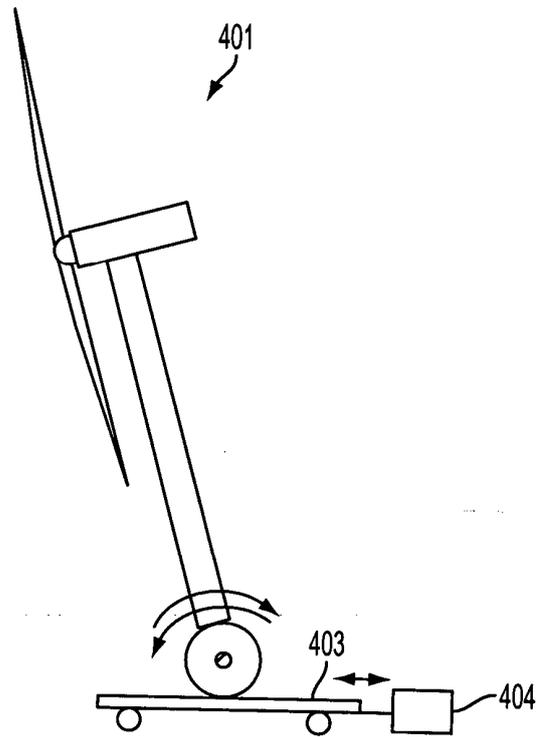


FIG. 4b

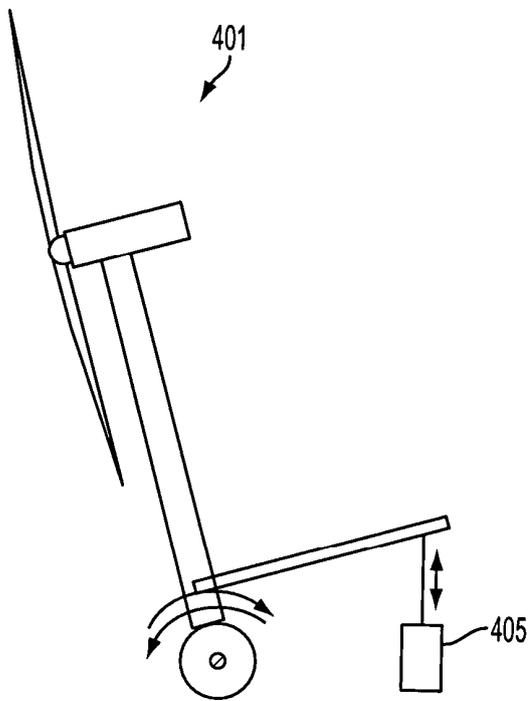


FIG. 4c

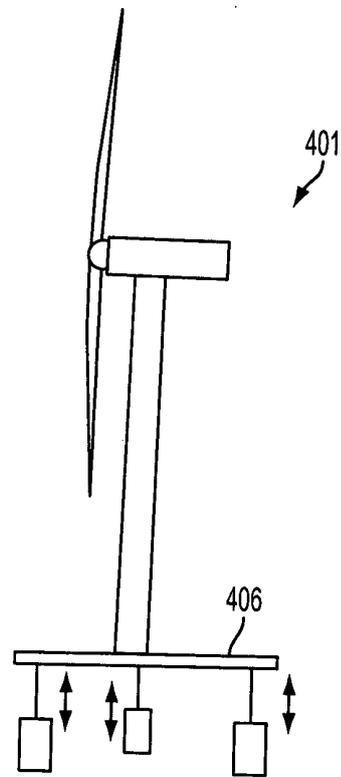


FIG. 4d

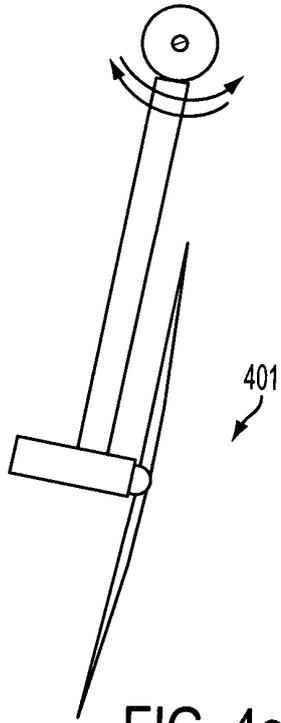


FIG. 4e

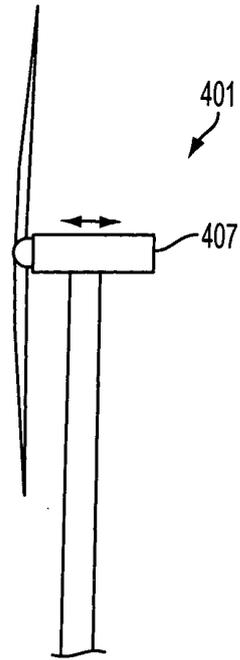


FIG. 4f

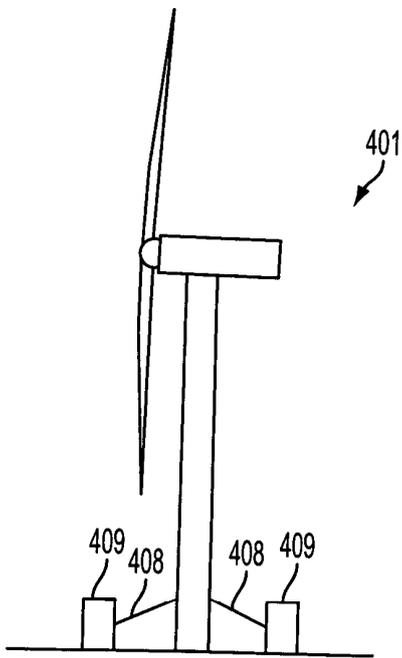


FIG. 4g

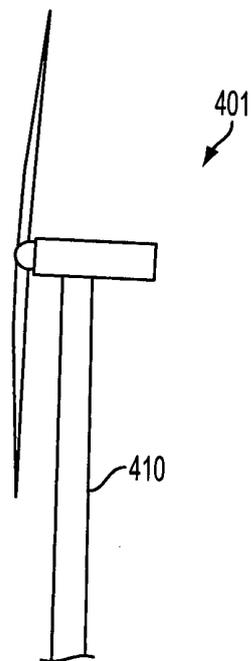


FIG. 4h

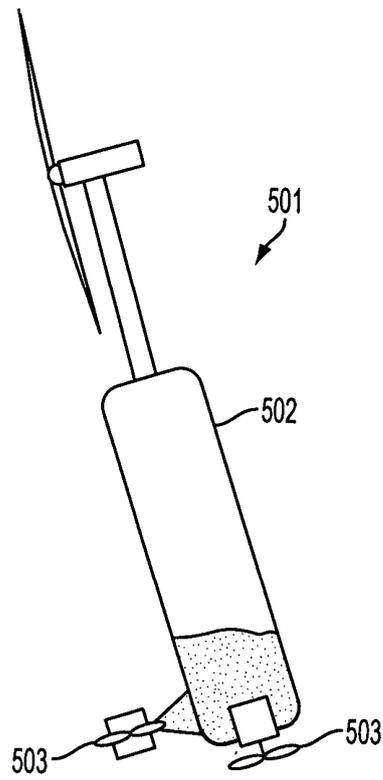


FIG. 5a

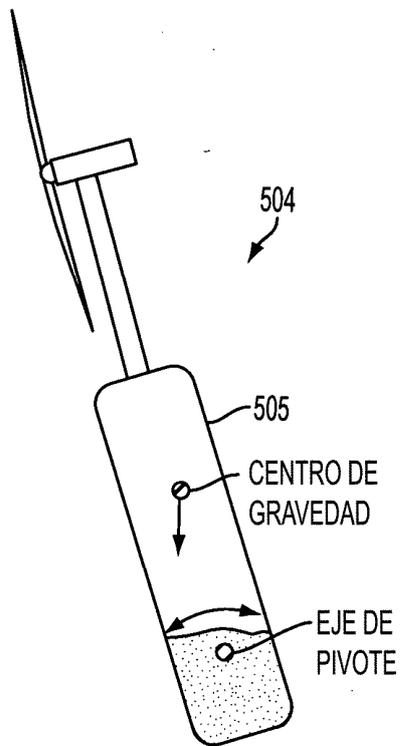


FIG. 5b

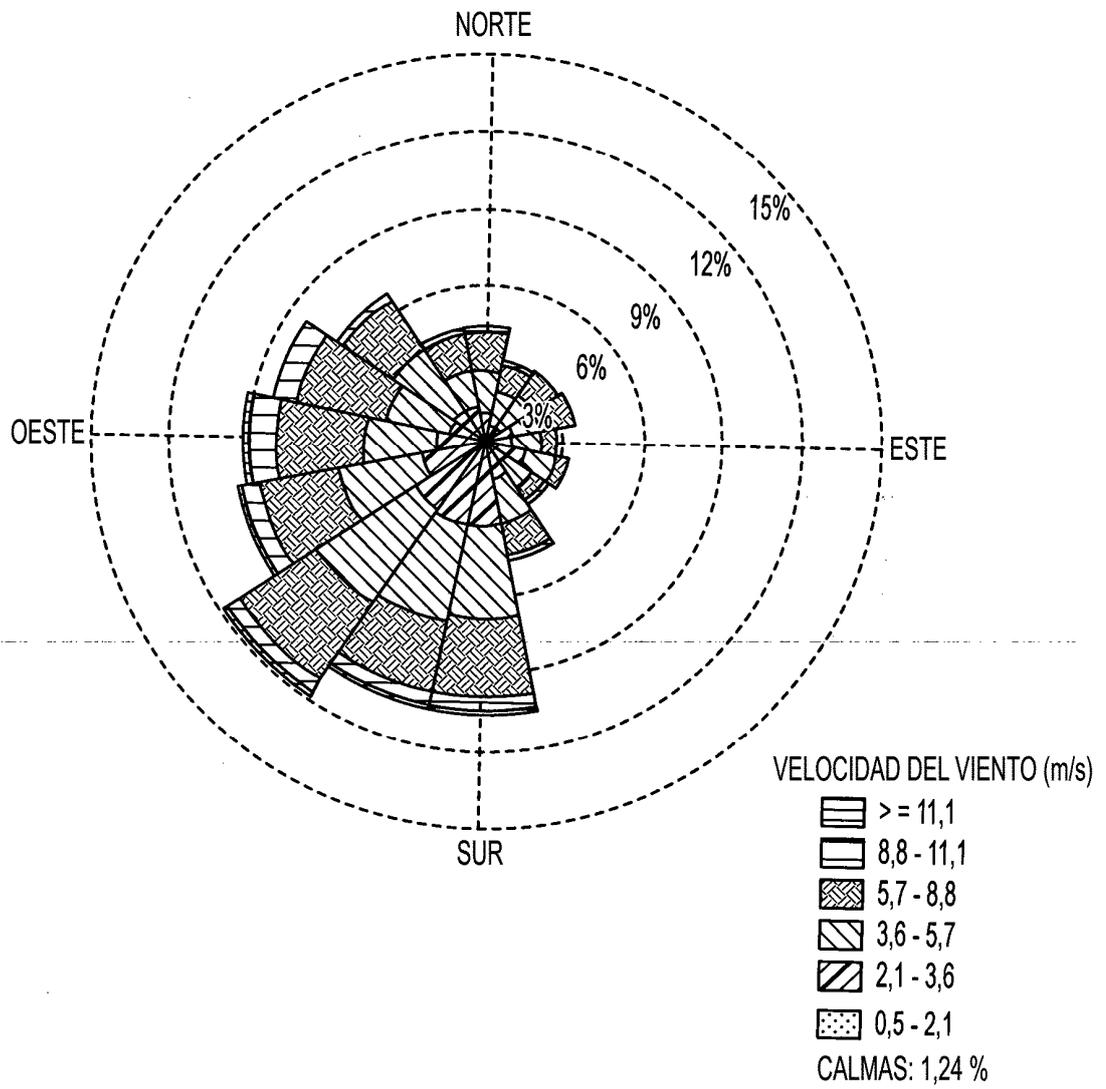


FIG. 6

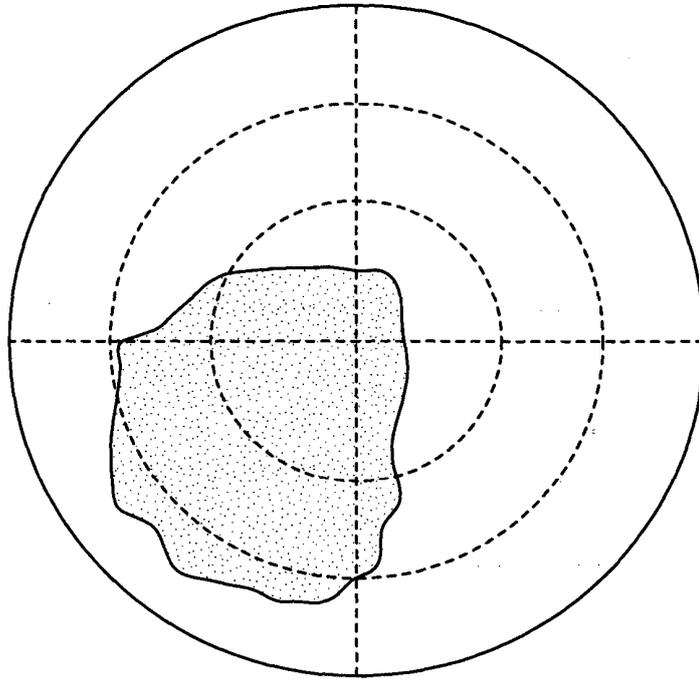


FIG. 7

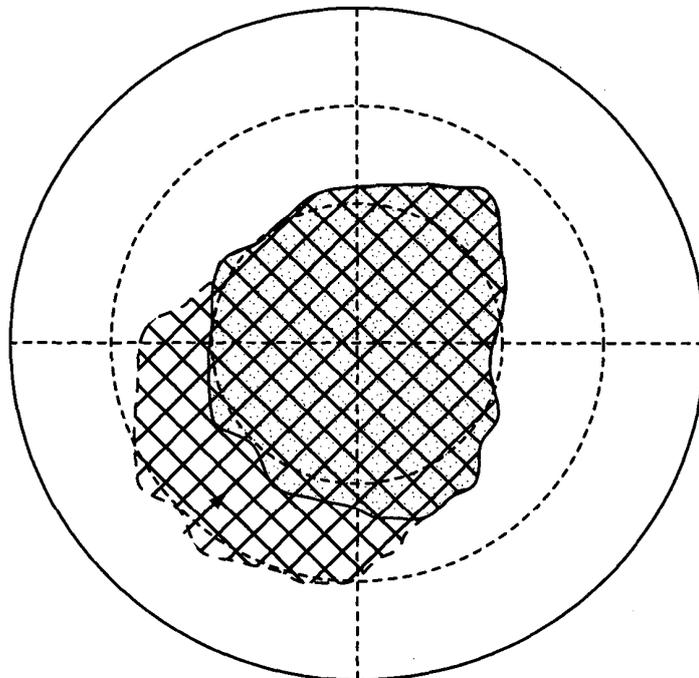


FIG. 8