

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 859 633**

51 Int. Cl.:

**G01M 7/08** (2006.01)

**F03D 17/00** (2006.01)

**G01M 5/00** (2006.01)

**G01M 7/02** (2006.01)

**G01M 7/06** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.12.2011 E 11195348 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.02.2021 EP 2522975**

54 Título: **Aparato de prueba de pala de turbina eólica**

30 Prioridad:

**07.03.2011 GB 201103861**

**26.05.2011 US 201161490372 P**

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

**04.10.2021**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**GUY, STUART y**

**ERSKINE, TIM**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 859 633 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

Aparato de prueba de pala de turbina eólica

5 **Antecedentes de la invención**

La invención se refiere a un aparato de prueba de pala de turbina eólica y a un método para someter a prueba una pala de turbina eólica. Se refiere en particular a un aparato de prueba de pala de turbina eólica adecuado para someter a prueba palas de turbina eólica para su uso en la generación de electricidad a gran escala en un parque eólico, por ejemplo.

Las palas de turbina eólica para su uso en turbinas eólicas de gran escala en parques eólicos se están haciendo cada vez más grandes. Por ejemplo, las longitudes de las palas pueden ser superiores a 50 m. Los nuevos diseños de estas palas cada vez más grandes generalmente se someten a prueba mecánicamente por fatiga antes de ponerse en uso para garantizar que sean fiables durante la vida útil de la turbina eólica.

En uso normal, las palas de turbina eólica oscilan cuando rotan a medida que cambian las fuerzas que actúan sobre ellas. Las palas de turbina eólica se someten a dos tipos de carga, concretamente, carga aerodinámica (en forma de, por ejemplo, sustentación, resistencia y cizallamiento) y carga inercial (en forma de, por ejemplo, gravedad y dinámica de palas). Las cargas se observan en las direcciones tanto en el sentido de la aleta como en el sentido del borde de una pala de turbina eólica tal como se ilustra en la figura 1. La dirección en el sentido del borde es la dirección de rotación de la pala de turbina eólica, en uso, y la dirección en el sentido de la aleta es perpendicular a esta y también perpendicular al eje longitudinal de la pala. Los momentos de flexión aerodinámicos generalmente están asociados con la dirección en el sentido de la aleta. Estos se atribuyen principalmente a la velocidad de viento estocástico, es decir, turbulencia. Las cargas inerciales generalmente están asociadas con la dirección en el sentido del borde. Las cargas pueden atribuirse, en general, a las cargas por gravedad experimentadas durante cada rotación de la pala y son de naturaleza más determinista. En palas pequeñas, las cargas en la dirección en el sentido de la aleta dominan las cargas en el sentido del borde. Por lo tanto, pueden someterse a prueba adecuadamente palas pequeñas solo en una dirección (en el sentido de la aleta). Sin embargo, con las palas más grandes de hoy en día, las cargas en el sentido del borde se vuelven más significativas a medida que la carga de gravedad de una pala aumenta proporcionalmente más que su carga del viento con la longitud de pala. Por lo tanto, para palas más grandes, someter a prueba un solo eje no proporciona una prueba válida y se requiere una prueba biaxial.

La prueba de la pala se realiza normalmente excitando la pala a su frecuencia natural (la frecuencia en la que un sistema vibra naturalmente una vez que se ha puesto en movimiento). De esta manera, es posible simular los momentos de flexión de prueba requeridos en toda la pala. Palas de turbina más largas tienen frecuencias naturales más bajas y aumentan los tiempos de prueba, ya que generalmente se requiere que las palas se sometan a prueba durante un número particular de oscilaciones. Además, las frecuencias naturales en el sentido del borde y en el sentido de la aleta son diferentes. La frecuencia natural en el sentido del borde de una pala de turbina eólica es mayor que la frecuencia natural en el sentido de la aleta. Un tiempo de prueba normal durante el que una pala puede hacerse oscilar continuamente a la frecuencia natural en cada dirección es del orden de 3 meses. Además de esta carga, las palas más nuevas y más largas son cada vez más flexibles, lo que requiere más energía para hacer oscilar a las mismas.

En una disposición de prueba simple (no mostrada), alojada normalmente en un edificio grande para cubrir la pala que está sometiéndose a prueba, un extremo de una pala de turbina eólica (que, en uso, estaría conectado al buje de la turbina eólica) se fija a un soporte de hormigón sustancial que puede pesar varios miles de toneladas para soportar las cargas sustanciales aplicadas a la pala durante la prueba. El otro extremo de la pala se hace oscilar en una dirección para someterlo a prueba en esa dirección aplicando una masa oscilante a la superficie superior de la turbina eólica que oscila a la frecuencia natural de la pala en la dirección en la que está oscilando, por ejemplo, durante tres meses. La masa oscilante es normalmente una masa montada en un motor eléctrico rotatorio. Una vez que se completa la prueba, la pala de turbina eólica se hace rotar 90° y se aplica una masa oscilante a lo que ahora es la superficie superior de la pala de turbina eólica y la prueba se repite a una frecuencia diferente correspondiente a la frecuencia natural de la pala en la dirección en la que está oscilando ahora de nuevo durante, por ejemplo, tres meses.

Se conoce un número de disposiciones de prueba de fatiga biaxial para someter a prueba la pala simultáneamente en dos direcciones (en el sentido de la aleta y en el sentido del borde). Claramente, esto reduciría el tiempo de prueba global de la pala de turbina eólica. Sin embargo, el control correcto es extremadamente difícil. Esto se debe a que, tal como se mencionó anteriormente, la pala debe oscilar a diferentes frecuencias en las direcciones en el sentido del borde y en el sentido de la aleta. Normalmente, la oscilación en una de estas direcciones afecta a la oscilación en la otra dirección.

La solicitud de patente estadounidense n.º US2006/0037402 describe una disposición que permite la prueba biaxial simultánea. El mecanismo para aplicar cargas en el sentido de la aleta incluye un actuador y una masa montada en la pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba. Un sistema de control controla el actuador para alternar linealmente la masa en la dirección en el sentido de la aleta a aproximadamente la frecuencia de resonancia de la pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba. Otro mecanismo aplica cargas en el sentido del borde a la pala de

turbina eólica que está sometiéndose a prueba. Este mecanismo incluye otro actuador acoplado a la pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba mediante una leva acodada montada de manera pivotante y una varilla de empuje. El sistema de control controla también las pruebas en el sentido del borde.

5 El uso de una masa pesada oscilante o alternante en la pala aumenta la masa de la pala que está sometiéndose a prueba, lo que aumenta la frecuencia natural de la pala que está sometiéndose a prueba. Además, esta disposición es ineficiente y difícil de controlar porque el ángulo de la varilla de empuje siempre está cambiando a lo largo del tiempo. Este sistema de prueba también es de gran tamaño.

10 Otra disposición para la prueba biaxial simultánea se describe en la solicitud de patente internacional n.º WO 2009/097055. En esta disposición, la pala de turbina eólica sometida a prueba está montada en un armazón. Los actuadores que se mueven perpendiculares entre sí actúan sobre el armazón en diferentes lados de la pala. Un actuador proporciona cargas en el sentido de la aleta aplicando fuerza a un brazo o aleta de palanca conectado a la pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba y provocando que la pala de turbina eólica oscile. El otro  
15 actuador proporciona cargas en el sentido del borde aplicando una fuerza para provocar un desplazamiento lineal. Los actuadores se hacen funcionar por un sistema de control con desplazamiento proporcionado a frecuencias naturales u otras frecuencias. El sistema de control usa un bucle de retroalimentación que recibe datos desde sensores, tales como galgas extensiométricas, ubicados en las partes de aleta y borde de la pala.

20 Esta disposición requiere que los actuadores proporcionen grandes fuerzas en la dirección en el sentido del borde, en particular, y, al igual que la otra disposición de la técnica anterior descrita anteriormente, es difícil de controlar y es de gran tamaño.

25 Ambas disposiciones de prueba biaxial de la solicitud de patente estadounidense n.º US2006/0037402 y la solicitud de patente internacional n.º WO 2009/097055 descritas anteriormente tienen actuadores que actúan sobre la pala de turbina eólica ortogonales entre sí.

30 El documento WO2009/097049 también describe un aparato de prueba de pala de turbina eólica con actuadores para proporcionar accionamiento concurrente en direcciones en el sentido de la aleta y en el sentido del borde.

Los inventores del aparato de prueba de pala de turbina eólica descrito a continuación son los primeros en apreciar que una pala de turbina eólica y, en particular, una pala de turbina eólica grande que podría usarse en una turbina eólica en un parque eólico, puede someterse a prueba adecuadamente en las direcciones en el sentido de la aleta y en el sentido del borde simultáneamente usando un par de actuadores que pueden alternarse linealmente, tales como  
35 actuadores hidráulicos, cada uno dispuesto para suministrar un impulso a una pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba y el impulso suministrado por cada uno de los actuadores proporciona una fuerza controlada en las direcciones en el sentido de la aleta y en el sentido del borde.

40 Las palas de turbina eólica tienen baja rigidez en la dirección en el sentido de la aleta y, por lo tanto, requieren un alto desplazamiento en esta dirección para lograr los momentos de flexión objetivo y la amortiguación aerodinámica en esta dirección es el factor predominante. Por el contrario, la dirección en el sentido del borde solo requiere fuerzas para superar la amortiguación estructural relativamente baja. Por lo tanto, las fuerzas requeridas para superar las fuerzas mencionadas anteriormente son mucho mayores en la dirección en el sentido de la aleta que en la dirección en el sentido del borde. Esto se proporciona mediante ejemplos de la disposición descrita en el presente documento.  
45 La ejecución de la prueba a la frecuencia natural de la pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba significa que se produce resonancia (la resonancia es la acumulación de gran amplitud que se produce cuando una pala de turbina eólica se excita a su frecuencia natural), y la única fuerza requerida es la que supere la amortiguación estructural y aerodinámica de la pala. En este caso, normalmente, la relación de fuerzas en el sentido de la aleta con respecto a fuerzas en el sentido del borde es 10:1.

50 Ejemplos del aparato de prueba de pala de turbina eólica descrito en el presente documento proporcionan pruebas rápidas, eficientes y fiables de palas de turbina eólica en dos direcciones (en el sentido del borde y en el sentido de la aleta) simultáneamente en un diseño compacto. Ejemplos requieren solo una baja distancia de separación en el suelo debajo de la pala que está sometiéndose a prueba. En general, esto permite una mejor optimización del diseño de pala de turbina eólica y, como resultado, tiempos más cortos para llevar un nuevo producto al mercado. Aparatos de prueba de pala de ejemplo descritos pueden compensar cambios en el ángulo de actuador.  
55

Al excitar la pala que está sometiéndose a prueba a su frecuencia natural, los momentos de flexión locales requeridos pueden lograrse mediante la distribución de masa. Esto permite una energía baja requerida por prueba y fuerzas de excitación requeridas relativamente bajas. Como resultado del último efecto, la resistencia relativa requerida del equipo de prueba es baja, lo que reduce los costes.  
60

Ejemplos del aparato de prueba de pala de turbina eólica descrito en el presente documento también proporcionan ventajas en lo que respecta a pruebas de un solo eje. Restringen el movimiento en el eje a lo largo del cual no está sometiéndose a prueba la pala y esto reduce el acoplamiento cruzado entre las direcciones en el sentido del borde y en el sentido de la aleta. La pala no requiere regulación de paso entre las pruebas en el sentido del borde y en el  
65

sentido de la aleta. Además, aparatos de prueba de pala de turbina de ejemplo usados en pruebas de un solo eje también proporcionan cargas medias correctas para pruebas en el sentido del borde.

**Sumario de la invención**

5 La invención en sus diversos aspectos se define en las reivindicaciones independientes a continuación. Se definen características ventajosas en las reivindicaciones dependientes a continuación.

10 Una realización preferida de la invención se describe con más detalle a continuación y adopta la forma de un aparato de prueba de pala de turbina eólica que comprende un par de actuadores que pueden alternarse linealmente, tales como actuadores hidráulicos. Cada uno de los actuadores está conectado al suelo y está dispuesto para suministrar un impulso a una pala de turbina eólica que está sometándose a prueba. Los actuadores están cada uno inclinados un ángulo con respecto a la pala de turbina eólica que está sometándose a prueba. El impulso suministrado por cada uno de los actuadores proporciona una fuerza controlada en las direcciones tanto en el sentido del borde como en el sentido de la aleta.

15 Esta disposición permite que la carga de una pala de turbina eólica que está someténdose a prueba pueda controlarse fácilmente en dos ejes (en el sentido de la aleta y en el sentido del borde) simultáneamente. Alternativamente, permite pruebas estables en un solo eje (en el sentido de la aleta o en el sentido del borde) ya que puede restringir el movimiento en el eje que no está someténdose a prueba. Para pruebas de un solo eje, con la disposición descrita en el presente documento, no sería necesario regular el paso de la pala que está someténdose a prueba entre las pruebas en el sentido del borde y en el sentido de la aleta (y viceversa). Además, para pruebas de un solo eje, con la disposición descrita en el presente documento, pueden proporcionarse cargas medias correctas para pruebas en el sentido del borde que reflejan las experimentadas en el uso real en el campo. Las pruebas de fatiga en el sentido del borde conocidas tienen altas cargas medias en el sentido del borde y ninguna carga media en el sentido de la aleta. Por el contrario, en uso en el campo, las palas de turbina eólica tienen altas cargas medias en el sentido de la aleta y ninguna carga media en el sentido del borde.

20 La disposición permite llevar a cabo pruebas de una manera realista y precisa.

30 Realizaciones tienen un tiempo de ciclo bajo ya que no usan una masa rotatoria pesada en la pala que está someténdose a prueba, lo que aumenta la frecuencia natural de la pala. Además, la fuerza puede ser mayor que las masas rotatorias, lo que permite el sometimiento a prueba de palas más grandes.

35 La disposición también proporciona una configuración compacta.

Los actuadores pueden estar ambos dispuestos para suministrar un impulso al mismo lado de la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba. Esto proporciona una configuración particularmente compacta.

40 Cada uno de los actuadores puede controlarse de manera independiente. Cada uno de los actuadores puede controlarse de manera independiente mediante un controlador de bucle cerrado.

45 Los actuadores pueden ser arietes o actuadores hidráulicos. Esto permite que el aparato de prueba logre amplitudes altas. Esto es importante ya que las palas de turbina eólica modernas son muy flexibles y requieren altas amplitudes (y, de hecho, alta energía) para hacerlas oscilar.

50 Uno de los actuadores puede estar en un ángulo agudo y el otro actuador puede estar en un ángulo obtuso con respecto al suelo. Los actuadores pueden estar dispuestos en un ángulo agudo entre sí. El ángulo agudo entre los actuadores puede ser inferior a 70°, inferior a 45° o inferior a 35°.

Los extremos de los actuadores pueden estar separados en la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba. Alternativamente, los actuadores pueden ser coaxiales donde se conectan en la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.

55 Pueden proporcionarse sensores para montar separados a lo largo de la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba. Los sensores pueden comprender galgas extensiométricas. Al menos algunos de los sensores pueden adaptarse para medir la tensión en dos direcciones ortogonales de la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.

60 En un aspecto de la invención, se proporciona un método para someter a prueba una pala de turbina eólica con un aparato de prueba tal como se definió anteriormente que comprende: controlar ambos de un par de actuadores que pueden alternarse linealmente para suministrar ambos un impulso a una pala de turbina eólica que está someténdose a prueba con una fuerza en las direcciones tanto en el sentido del borde como en el sentido de la aleta.

**Breve descripción de los dibujos**

Ahora se describirán realizaciones preferidas de la invención, a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos en los que:

5 la figura 1 es un esquema que muestra convenciones de denominación de fuerzas que actúan sobre una pala de turbina eólica;

10 la figura 2 es una vista de extremo de una sección transversal de un aparato de prueba de pala de turbina eólica que materializa un aspecto de la presente invención;

la figura 3 es un esquema de un sistema de control de un aparato de prueba de pala de turbina eólica que materializa un aspecto de la presente invención;

15 las figuras 4A y 4B son gráficos que muestran el desplazamiento, en un único punto de referencia en un plano, de un actuador de un aparato de prueba de pala de turbina eólica que materializa un aspecto de la presente invención;

20 la figura 4C es un gráfico que muestra el desplazamiento del actuador de las figuras 4A y 4B sumado para dar el perfil en dos planos;

la figura 5 es una vista lateral de una parte de un aparato de prueba de pala de turbina eólica que materializa un aspecto de la presente invención;

25 la figura 6 es una vista en perspectiva desde abajo de un aparato de prueba de pala de turbina eólica que materializa un aspecto de la presente invención; y

la figura 7 es una vista de extremo de una disposición para la sujeción de una pala de turbina eólica que está sometida a prueba.

**30 Descripción detallada de realizaciones preferidas**

La figura 2 ilustra un aparato de prueba de pala de turbina eólica 100, que materializa aspectos de la presente invención, en el que está sometida a prueba una pala de turbina eólica 102. Brevemente, el aparato de prueba de pala de turbina eólica usa una excitación proporcional hidráulica o válvulas proporcionales en un actuador hidráulico para generar una fuerza de entrada sinusoidal sobre la pala de turbina eólica que está sometida a prueba que se mantiene mediante un sistema de control de bucle cerrado. Esto elimina cargas transitorias, al tiempo que retiene la capacidad de carga de los actuadores hidráulicos y que proporciona estabilidad de carga.

40 Un extremo de la pala 102 que está sometida a prueba, en uso normal conectado a un buje de la turbina eólica, está conectado a una gran masa fija. El aparato de prueba 100 actúa sobre una parte de la pala separada del extremo fijo hacia la punta de la pala.

45 El aparato de prueba o el aparato de prueba de fatiga 100 generalmente tiene la forma de un denominado manipulador paralelo. Comprende un par de actuadores 104 que pueden alternarse linealmente, cada uno dispuesto para suministrar un impulso o desplazamiento a una pala de turbina eólica 102 que está sometida a prueba. Los actuadores están cada uno inclinados en un ángulo con respecto a la pala de turbina eólica que está sometida a prueba. Ambos actúan sobre el mismo lado, cara o superficie de la pala de turbina eólica que está sometida a prueba.

50 En este ejemplo, los actuadores 104 son arietes o actuadores hidráulicos. Los actuadores hidráulicos tienen una alta capacidad de carga que es la más adecuada para someter a prueba palas de turbina eólica modernas y grandes.

55 Un extremo 106 de cada actuador 104 está sujeto a una base 108. La base está conectada al suelo 110 de un edificio de pruebas mediante conectores tales como tuercas y pernos 112. Por lo tanto, un extremo de cada uno de los actuadores se fija con respecto a un extremo del otro actuador. Mediante el montaje en el suelo del excitador o actuador hidráulico, pueden introducirse altas cargas y no hay cargas medias no deseadas en la pala (tal como es el caso cuando se coloca una masa oscilante en la pala 102 para hacerla oscilar tal como se describió anteriormente con referencia a la solicitud de patente estadounidense n.º US2006/0037402). Este extremo libre de cada actuador está conectado a un conjunto de sujeción 116 que sujeta o retiene una parte de la pala de turbina eólica que está sometida a prueba.

60 Los actuadores 104 están cada uno inclinados un ángulo con respecto a la pala de turbina eólica 102 que está sometida a prueba. El extremo libre 114 de cada actuador sobresale en una dirección generalmente hacia arriba desde la base 108. En este ejemplo, uno de los actuadores está en un ángulo agudo con respecto al suelo 110 y el otro está en un ángulo obtuso con respecto al suelo; los actuadores están en un ángulo agudo uno con respecto al otro. Los actuadores están separados, en sus extremos libres, en la dirección en el sentido del borde. Los actuadores

también se extienden en la dirección en el sentido del borde. El ángulo entre los actuadores es ajustable. La selección del ángulo depende de la relación de fuerza del sentido de la aleta con respecto al sentido del borde. En este ejemplo, el ángulo entre los actuadores es inferior a  $35^\circ$  y, en particular,  $30,01521644^\circ$ . Otros ángulos entre los actuadores son posibles, tales como inferior a  $70^\circ$  o inferior a  $45^\circ$ .

Los actuadores 104 incluyen servoválvulas 118 que controlan el flujo de fluido hidráulico a su actuador y, por lo tanto, su desplazamiento. Las servoválvulas 118 de los actuadores hidráulicos 104 son válvulas proporcionales. Generan una fuerza sinusoidal u oscilante en los actuadores hidráulicos. Esto elimina cargas transitorias y retiene la capacidad de carga que proporcionan los actuadores hidráulicos al tiempo que también proporciona estabilidad de carga. Los actuadores hidráulicos, y las válvulas proporcionales en particular, están controlados por un sistema de control de bucle cerrado que se describe a continuación.

Los actuadores 104 son dispositivos de pistón dual con orificio y anillo simétricos. Esto garantiza una respuesta de bucle simétrica en ambas direcciones.

Tal como se mencionó anteriormente, el aparato de prueba de pala de turbina eólica 100 incluye un controlador 200 ilustrado en la figura 3. El controlador controla el aparato de prueba de pala de tal manera que el impulso o desplazamiento suministrado por cada uno de los actuadores 104 proporciona una fuerza controlada en las direcciones en el sentido del borde y en el sentido de la aleta de la pala 102 que está sometida a prueba. En este ejemplo, el controlador controla el aparato de prueba de pala de turbina eólica y, en particular, sus actuadores, de manera que la pala que está sometida a prueba oscile simultáneamente a diferentes frecuencias naturales de la pala de turbina eólica en las direcciones en el sentido del borde y en el sentido de la aleta. Alternativamente, el controlador puede controlar el aparato de prueba de pala de turbina eólica y, en particular, sus actuadores, de manera que la pala que está sometida a prueba se hace oscilar solo en una dirección (en el sentido de la aleta o en el sentido del borde) a la frecuencia natural en esa dirección.

Como hay dos actuadores 104 controlados, hay dos grados de libertad para controlar, en la dirección en el sentido de la aleta (eje y mostrado en la figura 2) y en el sentido del borde (eje z mostrado en la figura 2). En la práctica, también hay una pequeña cantidad de movimiento incontrolado a lo largo del eje longitudinal de la pala de turbina eólica 102 (a lo largo del eje x de la figura 2).

Adicionalmente, los dos actuadores 104 pueden controlarse para proporcionar un movimiento de rotación de la pala 102 si se desea.

El controlador 200 recibe señales desde sensores (no mostrados), en forma de galgas extensiométricas, montados, separados, a lo largo de la pala de turbina eólica 102 que está sometida a prueba. El controlador controla los desplazamientos o impulsos del par de actuadores 104, usando retroalimentación de desplazamiento, de manera que las fuerzas que actúan sobre la pala de turbina eólica que está sometida a prueba en las direcciones en el sentido de la aleta y en el sentido del borde se controlan de manera independiente.

En este ejemplo, los sensores están montados en puntos discretos separados a lo largo de la pala de turbina eólica 102 que está sometida a prueba. Puede haber, por ejemplo, entre 20 y 100 sensores separados a lo largo de la pala. Específicamente, en este ejemplo, 44 sensores están separados a lo largo de la pala. El número de sensores es proporcional a la longitud de la pala que está sometida a prueba. Cada uno de los sensores está adaptado para medir la tensión en dos direcciones ortogonales (horizontal y vertical/la dirección en el sentido del borde y en el sentido de la aleta) de la pala de turbina eólica que está sometida a prueba. De esta manera, la amplitud de tensión deseada en la pala puede lograrse en las direcciones tanto en el sentido de la aleta como en el sentido del borde. Se seleccionan como objetivo las tensiones generadas a partir de calibraciones.

El sistema de control 200 de la figura 3 proporciona control de posición de los actuadores 104; funciona en modo de posición. Esto garantiza que el perfil de desplazamiento de los actuadores se sigue con invariancia con respecto a las cargas reactivas estocásticas. El sistema de control tiene una referencia secuenciada. Es decir, la referencia es una secuencia de desplazamiento predeterminada. El sistema de control es altamente fiable para garantizar disposiciones de bajo tiempo de inactividad y a prueba de fallos.

El sistema de control 200 de la figura 3 es una denominada arquitectura de control inteligente conocida como sistema de control de aprendizaje iterativo (ILC).

El ILC funciona escribiendo y almacenando un historial de señales de error en la memoria e importándolo de vuelta al bucle en la siguiente iteración o etapa de tiempo. Está incrustado en una matriz de puertas programables en campo (FPGA). Esto permite un control rápido o una velocidad de bucle del orden de MHz. Esto es de muchos órdenes de magnitud por encima de la velocidad de oscilación de la pala de turbina eólica 102 y, por lo tanto, garantiza que el sistema de control 200 no sea el factor limitante. Esto es importante ya que el sistema que se controla es altamente dinámico. El ILC permite mejorar el rendimiento del control usando la experiencia anterior para reducir el error. El ILC tiene un conjunto generalizado de parámetros de ajuste, que se optimizan en cada aplicación mediante "autoajuste". Esto supera el problema de ajustar el sistema teniendo en cuenta que el sistema no es determinista y el

comportamiento de los sistemas hidráulicos o de actuador no es lineal y, por lo tanto, sería problemático encontrar una función de ajuste para adaptarse a todas las áreas de la secuencia.

5 En el sistema de control 200 de la figura 3, para cada uno del par de actuadores 104, el historial de errores de serie temporal  $e_k(t)$  se retroalimenta alrededor de un bucle cerrado o bucle de retroalimentación 201 en una señal de referencia  $u_k(t)$  en su correspondiente marca de tiempo dentro de una secuencia. La retroalimentación se pasa primero a través de un registro de desplazamiento de longitud  $n$  y filtro  $P(q)$  para atenuar su efecto de manera que la referencia y la posición real converjan después de un número máximo de secuencias  $u_{k+n}(t)$ . Esto se refleja en la fórmula:

$$10 \quad u_{k+1}(t) = L(q)u_k(t) + P(q)e_k(t)$$

Las señales de error para cada iteración se pasan a través de un algoritmo PID (proporcional-integral-derivativo) definido por:

$$15 \quad u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

donde  $K_n$  es una constante para la parte proporcional ( $K_p$ ), la parte integral ( $K_i$ ) y la parte derivativa ( $K_d$ ) del controlador PID.

20 Se aplica un acondicionador de salida a la salida del sistema PID. Esto aplica tasas de deriva máximas, niveles de saturación, calibración de cero y otras funciones para garantizar un alto rendimiento.

La secuencia dentro de la memoria también está sometida a un nivel de ganancia global  $K_0$  (el valor por defecto es una ganancia de 1), para permitir que un usuario realice ajustes menores con respecto al nivel objetivo.

25 Se incluyen dos bucles de control 201 del tipo descrito anteriormente, uno para controlar cada uno de los actuadores 104 del par de actuadores. Sin embargo, estos bucles se acoplan inherentemente cuando el movimiento de un actuador impacta en el otro. Esto es un efecto que el FPGA maneja de manera efectiva ya que proporciona procesamiento paralelo y cada bucle de control tiene recursos de procesamiento iguales y pueden sincronizarse.

30 El sistema de control 200 también incluye un sistema de seguridad o sistema de bloqueo de seguridad 202. Esto recibe una entrada desde el actuador 104 y las galgas extensiométricas montadas en la pala 102 que está sometiéndose a prueba. Esto garantiza que no se superen tolerancias de error máximas o fuerzas reactivas máximas. En el caso de que se supere cualquiera de estos máximos, se activa un colector de seguridad en el sistema hidráulico y el sistema se detiene. Es decir, el movimiento de actuador se detiene lentamente. Además, se borran los registros del ILC que almacena los parámetros ajustados. Esto evita el retorno inmediato a las fuerzas máximas superadas.

35 El sistema de control 200 incluye una entrada/salida reconfigurable (RIO) para adquirir una señal de retroalimentación a través de un convertidor de analógico a digital (ADC) para cada actuador 104 y para accionar las servoválvulas de cada actuador a través de un convertidor de digital a analógico (DAC).

40 Adicionalmente, el sistema de control 200 incluye una interfaz hombre-máquina (HMI) para el control de usuario usando un ordenador incorporado en tiempo real.

45 Las figuras 4A y 4B ilustran el desplazamiento a lo largo del tiempo  $t$  en una referencia de punto único en un plano, por ejemplo, en un extremo libre 114 de uno de los actuadores 104 de la figura 2. En la figura 4A, la referencia  $\sin Mx$  es el desplazamiento en la dirección en el sentido de la aleta. Es una amplitud máxima constante o, en otras palabras, una referencia media fija. En la figura 4B, la referencia  $\sin My$  está en la dirección en el sentido del borde. Esto muestra la referencia a través de una sola secuencia o tiempo de secuencia. Son dos ondas sinusoidales sumadas entre sí. Una con una frecuencia correspondiente a la frecuencia de resonancia en el sentido del borde y la otra, claramente, de una frecuencia de  $1/\text{tiempo de secuencia}$ . En otras palabras, la posición de referencia media se desplaza para dar el perfil de carga deseado. El gráfico de la figura 4C muestra los desplazamientos de las figuras 4A y 4B sumados para dar el perfil de desplazamiento, de una sola secuencia, en dos planos (en el sentido de la aleta y en el sentido del borde).

55 Una parte de ejemplo de un aparato de prueba de pala de turbina eólica 300, similar a la de la parte correspondiente del aparato de prueba de pala de turbina eólica 100 de la figura 2, se muestra en la figura 5 y a características similares se les han dado números de referencia similares. En la parte del aparato de prueba de pala de turbina eólica de la figura 5, los actuadores 104 no están separados en sus extremos libres 114. En otras palabras, los extremos de los actuadores hidráulicos son coaxiales.

60 La figura 6 muestra otro ejemplo de aparato de prueba de pala de turbina eólica 400. También es similar a la disposición de la figura 2 y a características similares se les han dado números de referencia similares. De manera similar al

aparato de prueba de ejemplo de la figura 5, el aparato de prueba de la figura 6 tiene actuadores hidráulicos 104 con extremos libres coaxiales 114. A diferencia de los ejemplos de las figuras 2 y 5, el extremo de base 106 de los actuadores hidráulicos está montado en un armazón 402 para sujetar los actuadores al suelo, y también para elevar el extremo de base de los actuadores hidráulicos desde el suelo 110.

5 El armazón 402 incluye patas 404 con pies 405 que descansan sobre y pueden deslizarse a lo largo de carriles 406 en el suelo. Hay un par de patas en cada lado de una viga 408 en la que se ubican los extremos 106 de los actuadores 204. Deslizar las patas de cada par a lo largo de los carriles alejándolas o juntándolas entre sí cambia la separación entre las mismas, para bajar o elevar la viga y, por lo tanto, los actuadores. La flexibilidad proporcionada por el ajuste de altura de esta disposición permite que se use para someter a prueba diferentes palas con diferentes desplazamientos de prueba medios. Puede proporcionarse un refuerzo lateral adicional (no mostrado). La torsión experimentada por el armazón se reduce o minimiza haciendo coincidir el ángulo de armazón con el ángulo de actuador cuando está en reposo. En otras palabras, hacer que el ángulo entre las patas sea el mismo que el ángulo entre los actuadores cuando están en reposo. En esta disposición, las fuerzas reactivas en los actuadores siguen el vector en el que se encuentran. Es decir, no se inducirá flexión.

Es deseable lograr un perfil de momento de flexión correcto a través de toda la pala durante las pruebas de fatiga en el sentido de la aleta y en el sentido del borde. Para lograr esto, en algunas configuraciones de prueba, una parte externa de la pala puede requerir masa añadida en la dirección en el sentido de la aleta y, en particular, una estructura para ubicarse sobre la pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba que incluye una masa móvil en un único eje. Esto se logra usando una masa con un grado de libertad de traslación en la dirección en el sentido del borde. Una disposición 500 de este tipo se ilustra en la figura 7. Incluye un elemento de sujeción 502 para sujetar la disposición a la pala de turbina eólica en la posición requerida a lo largo de la pala separada de la raíz de la pala. Las masas 504 en cada lado del elemento de sujeción están ubicadas en elementos de deslizamiento o barras 506 que se extienden por la superficie de la pala, en este ejemplo, en la dirección en el sentido del borde, de modo que las masas pueden moverse o deslizarse en la dirección en el sentido del borde indicada por la flecha 508. En uso, cuando la pala oscila, las masas se deslizan solo en la dirección en el sentido del borde. Por lo tanto, solo proporcionan una masa efectiva en la dirección en el sentido de la aleta.

30 Si bien se han descrito pruebas en palas de tamaño completo, la disposición de prueba podría aplicarse a una pala de turbina eólica en forma de un modelo a escala de una pala de tamaño completo. Para palas grandes (por ejemplo, con una longitud de 50 m o más), tales como las que se espera que se diseñen durante los próximos años, las partes hacia el interior de estas palas son las más críticas y se someten a la mayor relación de carga de fatiga biaxial. Las pruebas se dirigirían entonces a esta área, con secciones hacia el exterior sometidas a prueba a niveles relativamente bajos. Por lo tanto, las pruebas biaxiales podrían llevarse a cabo en modelos a escala para investigar los efectos dentro de la sección de raíz.

La invención se ha descrito con referencia a implementaciones de ejemplo, puramente por motivos de ilustración. La invención no debe estar limitada por estas, ya que al experto en la técnica se le ocurrirán muchas modificaciones y variaciones. La invención debe entenderse a partir de las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Aparato de prueba de pala de turbina eólica que comprende:
  - 5 un par de actuadores que pueden alternarse linealmente (104), cada uno dispuesto para suministrar un impulso a una pala de turbina eólica (102) que está sometándose a prueba;
  - 10 caracterizado porque los actuadores (104) están dispuestos para conectarse al suelo (110), y porque los actuadores (104) están cada uno inclinados un ángulo con respecto a la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba, mediante lo cual el impulso suministrado por cada uno de los actuadores (104) proporciona una fuerza controlada en las direcciones tanto en el sentido del borde como en el sentido de la aleta.
- 15 2. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 1, en el que los actuadores (104) están ambos dispuestos para suministrar un impulso al mismo lado de la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.
- 20 3. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 1 o 2, en el que cada uno de los actuadores se controla de manera independiente.
4. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 3, en el que cada uno de los actuadores se controla de manera independiente por un controlador de bucle cerrado (200).
- 25 5. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en el que los actuadores (104) comprenden actuadores hidráulicos.
6. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que uno de los actuadores (104) está en un ángulo agudo y el otro está en un ángulo obtuso con respecto al suelo.
- 30 7. Pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que los actuadores están dispuestos formando un ángulo agudo entre sí.
8. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 7, en el que el ángulo agudo entre los actuadores es menor de 70°.
- 35 9. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 7, en el que el ángulo agudo entre los actuadores es menor de 45°.
- 40 10. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 7, en el que el ángulo agudo entre los actuadores es menor de 35°.
11. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, en el que los extremos (114) de los actuadores están separados en la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.
- 45 12. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que el extremo (114) de los actuadores (104) son coaxiales donde se conectan en la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.
- 50 13. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, que comprende además sensores para montar separados a lo largo de la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.
14. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 13, en el que los sensores comprenden galgas extensiométricas.
- 55 15. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 13, en el que al menos algunos de los sensores están adaptados para medir tensión en dos direcciones ortogonales de la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.
- 60 16. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según cualquier reivindicación anterior, que comprende además una estructura (500) para ubicarse sobre una pala de turbina eólica que está someténdose a prueba, incluyendo la estructura una masa (504) montada para poder moverse a lo largo de un único eje (508).
17. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 16, en el que el único eje (508) está en la dirección en el sentido del borde de la pala de turbina eólica que está someténdose a prueba.
- 65 18. Aparato de prueba de pala de turbina eólica según la reivindicación 16 o 17, en el que la estructura (500) está

dispuesta de manera que la masa (504) se desliza a lo largo del eje durante la prueba.

19. Método para someter a prueba una pala de turbina eólica que comprende:

5 proporcionar un aparato de prueba de turbina eólica (100) según cualquier reivindicación anterior;

controlar ambos de un par de actuadores que pueden alternarse linealmente (104) para suministrar ambos un impulso a una pala de turbina eólica que está sometiéndose a prueba con una fuerza en las direcciones tanto en el sentido del borde como en el sentido de la aleta.

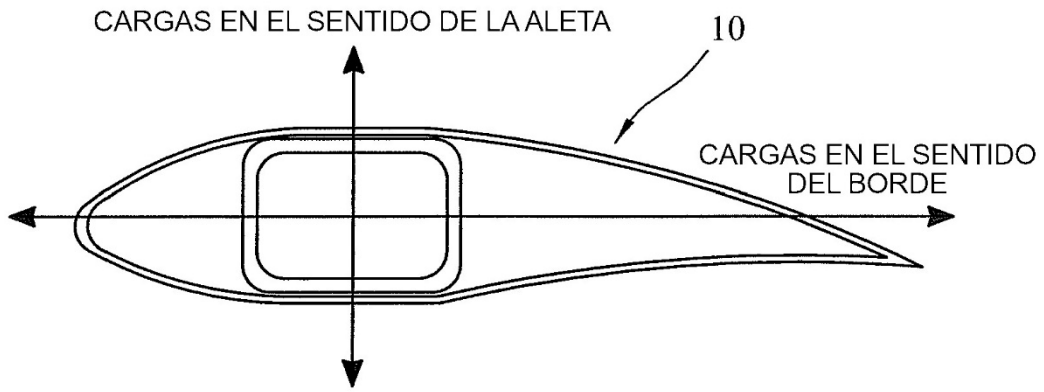


FIG. 1

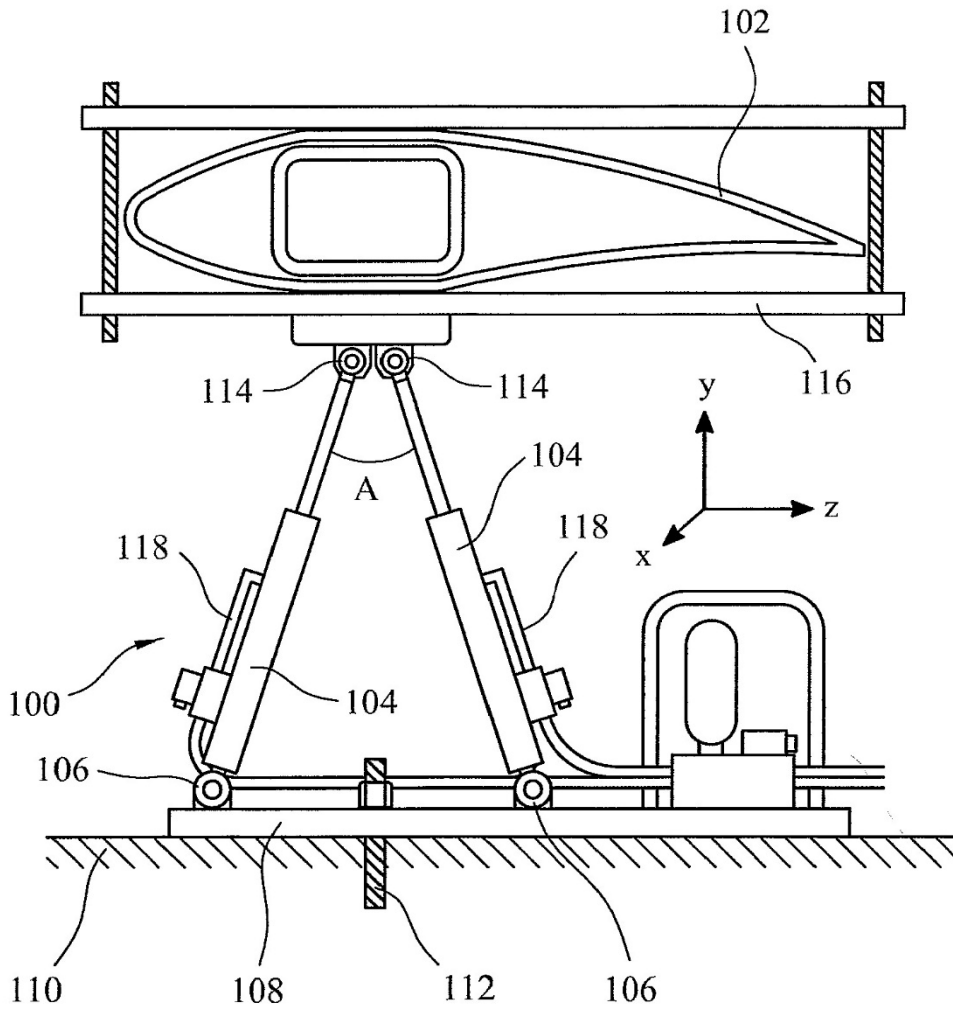
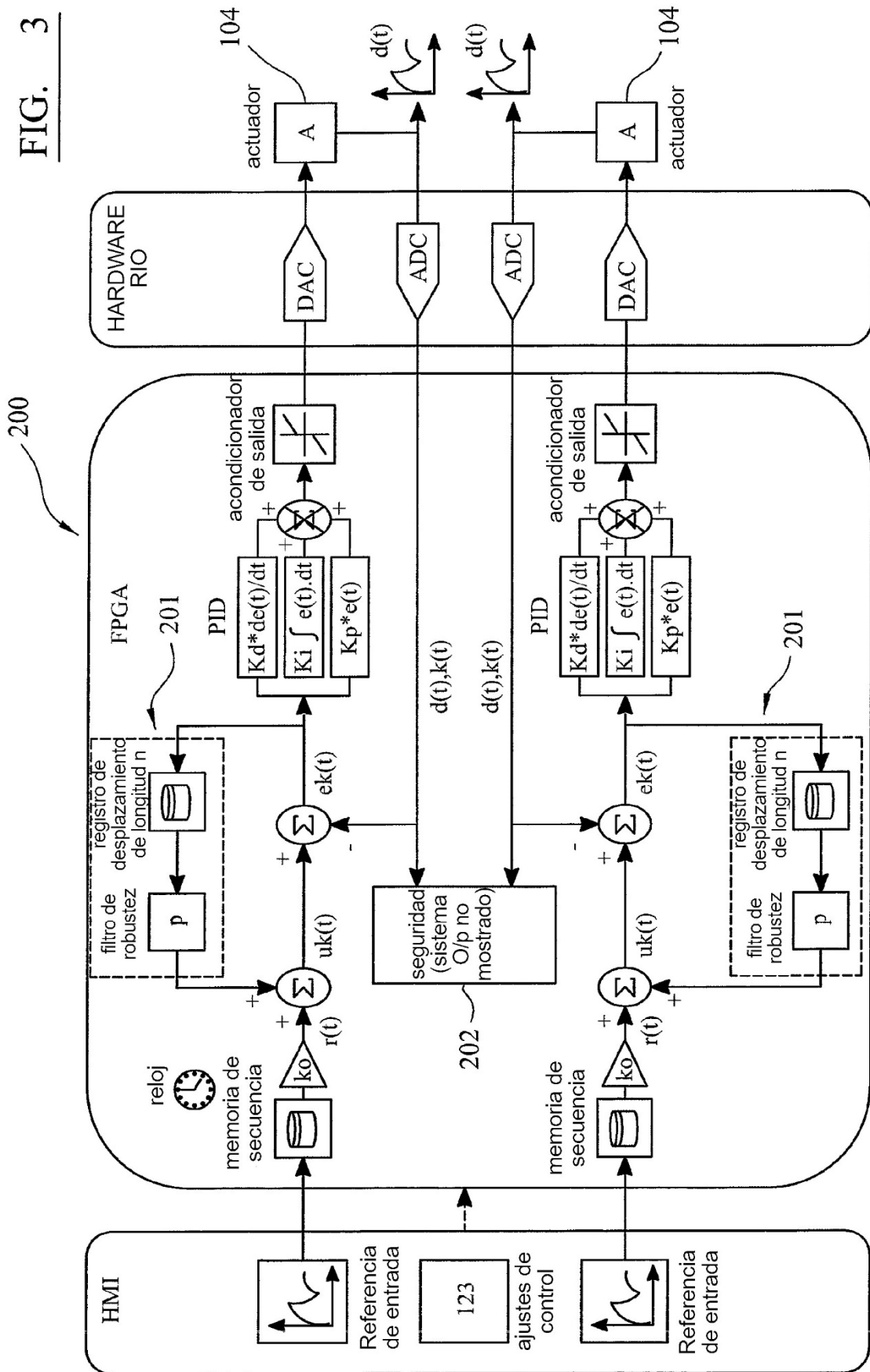


FIG. 2

FIG. 3



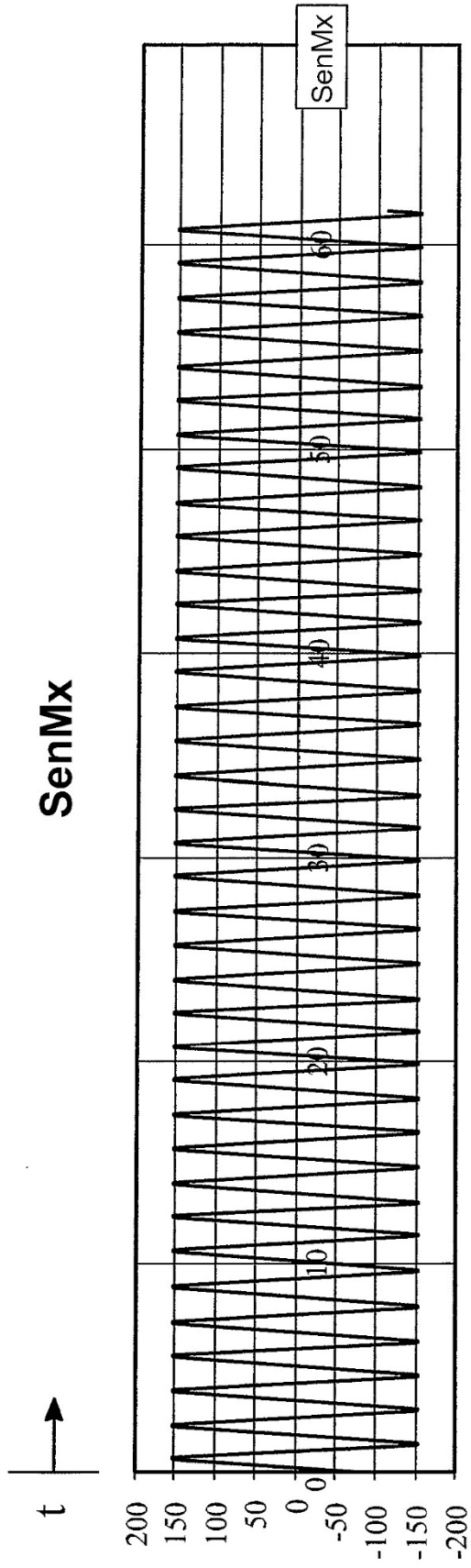


FIG. 4A

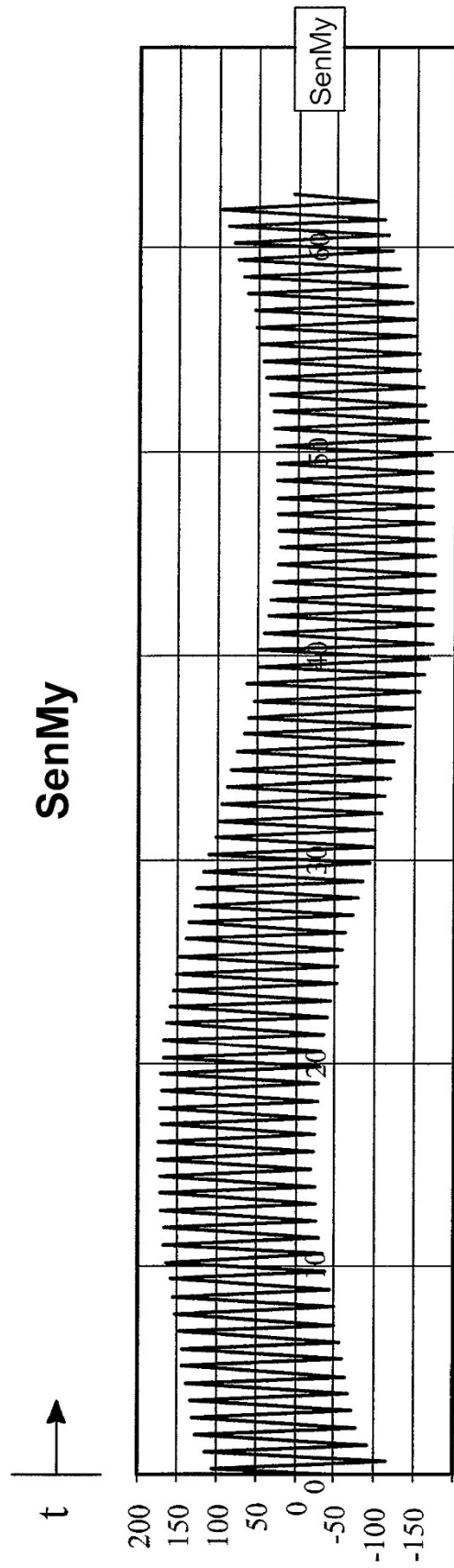


FIG. 4B

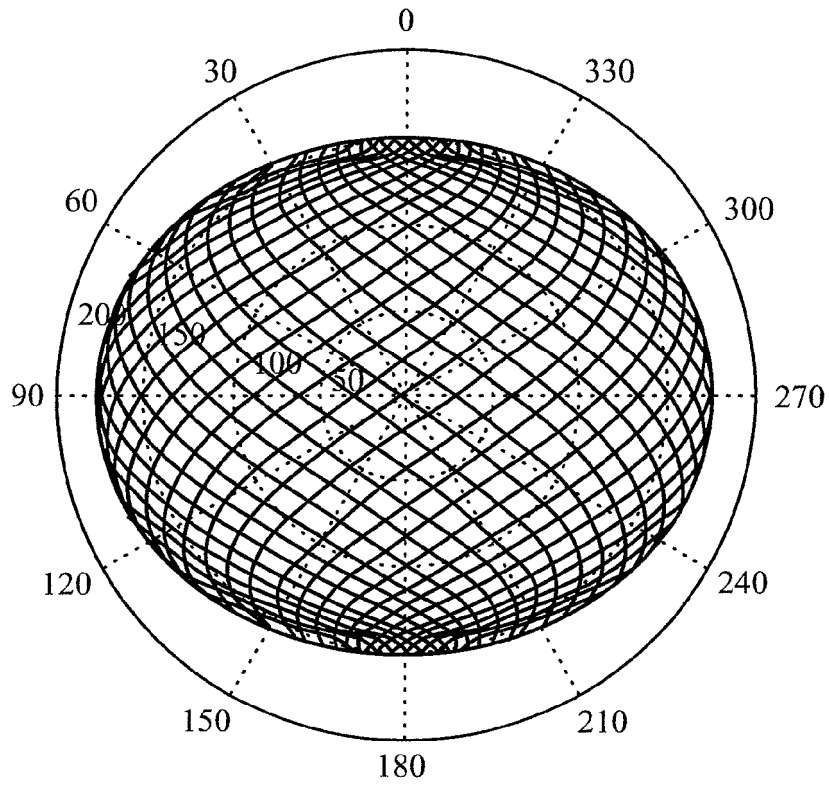


FIG. 4C

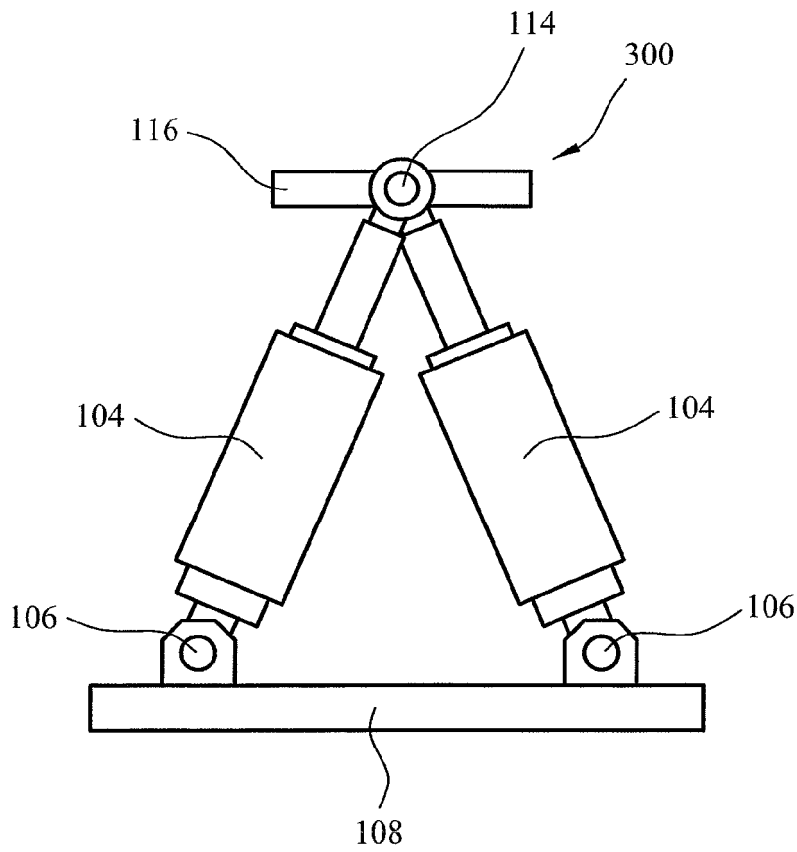


FIG. 5



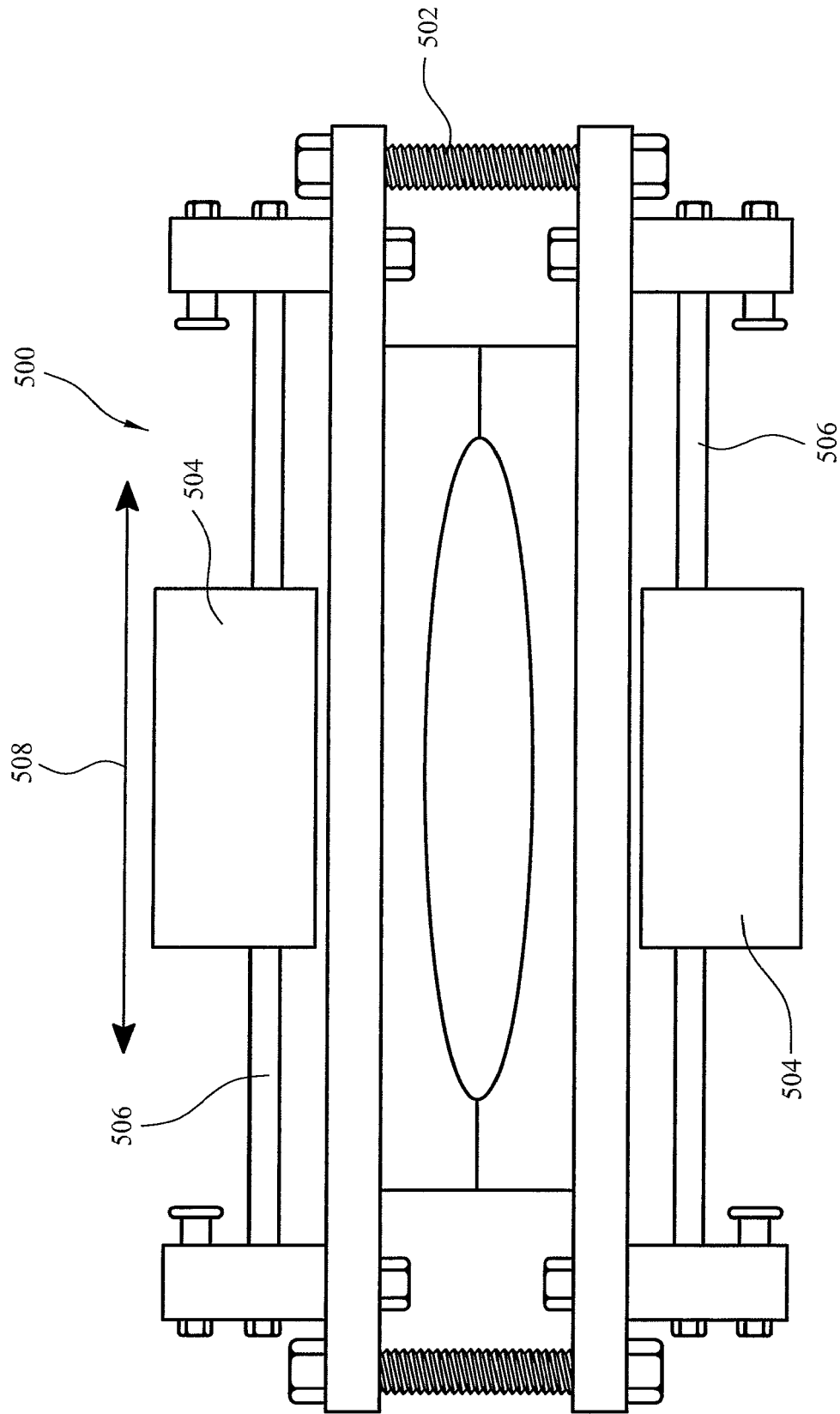


FIG. 7