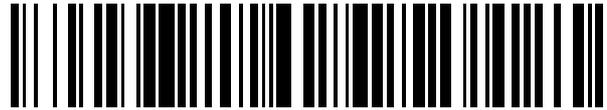


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 692 274**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.03.2014 PCT/US2014/023713**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.10.2014 WO14164891**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.03.2014 E 14779812 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.07.2018 EP 2971758**

54 Título: **Sistema de control de turbina eólica**

30 Prioridad:

**11.03.2013 US 201361776709 P**

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

**03.12.2018**

73 Titular/es:

**ILLING ENGINEERING SERVICES (100.0%)  
390 Smith Road  
Parksville, New York 12768, US**

72 Inventor/es:

**ILLING, WES**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 692 274 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**

Sistema de control de turbina eólica

5 Campo de la invención

Esta divulgación se refiere en general a turbinas eólicas y, más específicamente, al control del ángulo de paso de pala.

10 Antecedentes de la invención

Una turbina eólica incluye generalmente dos o más palas de rotor fijadas a un cubo que está acoplado de manera rotatoria a un árbol. El árbol está montado dentro de un alojamiento o góndola, que puede colocarse sobre una torre. La rotación del cubo con palas transforma la energía eólica en una fuerza o momento de fuerza rotacional que acciona uno o varios generadores acoplados al árbol.

15 Las ráfagas de viento han supuesto un obstáculo formidable con el que se han tenido que enfrentar los diseñadores de las turbinas eólicas modernas. Los cambios apreciables y repentinos en la velocidad y/o dirección del viento pueden sobrecargar o dañar los componentes y dar lugar a un fallo prematuro de la turbina eólica. Los primeros esfuerzos por mitigar los efectos negativos de las ráfagas de viento se centraron en cambiar mecánicamente el ángulo de paso de las palas de rotor utilizando una técnica conocida comúnmente como autoplegamiento, en la que un sistema de accionamiento de paso cambia el ángulo de paso de las palas de rotor, cambiando así el momento aerodinámico del rotor.

25 Aunque no era muy preciso, el autoplegamiento tendía a reducir las altas tasas de fallo, pero no en una medida suficiente para satisfacer los márgenes de diseño a largo plazo. Esfuerzos posteriores por parte de ingenieros eléctricos se centraron en diseños eléctricos con deslizamiento mejorado. Este enfoque permitió un deslizamiento del generador mucho mayor de lo normal cuando el viento proporcionaba más potencia que aquella para la que estaba diseñado el sistema y por tanto, permitía poco tiempo para que el sistema de control de paso respondiera a las nuevas condiciones de viento. Aunque los diseños eléctricos con deslizamiento mejorado demostraron ser superiores con respecto al enfoque de autoplegamiento mecánico, estos diseños resultaron ser también inadecuados. Los cambios en la velocidad y/o dirección del viento simplemente ocurren más rápido de lo que pueden adaptarse los sistemas de control. Por ejemplo, incluso con los sistemas de adquisición de datos a alta velocidad y las unidades de acondicionamiento de señales actuales, un tiempo de espera o retardo de 50 milisegundos no es una expectativa irrazonable y buena información de sensor podría tardar significativamente más tiempo. Además del tiempo de retardo para la adquisición y el acondicionamiento de datos de señal útiles, el sistema debe responder en un periodo de tiempo que evite un daño.

40 Las ráfagas de viento varían mucho. En general, mayores velocidades del viento en estado estable tienen ráfagas con magnitudes relativas inferiores. Por ejemplo, las ráfagas de viento podrían duplicar una velocidad del viento en estado estable de 12 millas por hora (mph), alcanzando en su punto máximo 24 mph, pero una velocidad del viento en estado estable de 30 mph podría tener ráfagas de sólo 50 mph. Además de la magnitud de la ráfaga, su duración es una variable muy significativa. Las ráfagas de viento de larga duración permiten que un sistema de control responda a tiempo y las ráfagas de viento de muy corta duración se atenúan de manera eficaz por efectos inerciales. Desafortunadamente, son muy comunes duraciones de ráfagas de viento entre 3 y 6 segundos, pero no son lo suficientemente largas para que el sistema de control responda a tiempo, y son demasiado largas para que la inercia del sistema simplemente las absorba. La ráfaga de 3-6 segundos impone una de las condiciones transitorias respecto a momento de fuerza y potencia más difíciles a las que tienen que enfrentarse los diseñadores y tanto las soluciones mecánicas como las eléctricas han demostrado ser inadecuadas. Históricamente, esto ha obligado a una solución de compromiso entre un diseño robusto y un coste razonable. Los departamentos de ingeniería y garantía de calidad se comprometen con los departamentos de marketing y ventas para mitigar los aumentos en los costes por diseños robustos a cambio de tasas de fallo "razonables" en campo. Solamente las tasas de fallo actuales de las transmisiones cuestan aproximadamente 50.000 \$ por año por megavatio. Este coste lo asumen los clientes, inversores, compañías de seguros y fabricantes en varios grados. Aunque las compañías de seguros pueden haber sido las primeras en limitar su exposición a los costes por fallos de transmisión, pronto les seguirán los inversores y clientes. En la memoria descriptiva de la patente europea EP1105645B1 puede encontrarse un ejemplo de un mecanismo y un procedimiento de ajuste de paso de una técnica anterior.

60 Sumario de la invención

Según un aspecto de la divulgación, una turbina eólica incluye un subsistema de cubo que comprende un cubo principal y un árbol adaptado para rotar sobre un eje, y una pluralidad de palas de turbina que tienen un ángulo de paso. Las palas están adaptadas para producir la rotación del subsistema de cubo a una primera velocidad. La turbina eólica incluye además un subsistema de accionamiento de paso. El subsistema de accionamiento de paso incluye un elemento de accionamiento adaptado para rotar sobre el eje a una segunda velocidad, y adaptado adicionalmente para controlar el ángulo de paso de las palas de turbina en relación con una diferencia entre la

5 primera velocidad y la segunda velocidad. La turbina eólica incluye además un generador con deslizamiento mejorado acoplado al subsistema de cubo y al subsistema de accionamiento de paso. El generador con deslizamiento mejorado permite que el subsistema de cubo rote a una velocidad diferente con respecto al subsistema de accionamiento de paso. La diferencia en la velocidad se rige por una función de deslizamiento. La turbina eólica incluye además un sistema de control activo adaptado para controlar la segunda velocidad del elemento de accionamiento.

10 Según otro aspecto de la divulgación, un procedimiento para controlar un ángulo de paso de pala de turbina eólica incluye las etapas de proporcionar un subsistema de cubo que comprende un cubo principal y un árbol, proporcionar una pluralidad de palas de turbina que tienen un ángulo de paso, accionar, mediante las palas de turbina, la rotación del subsistema de cubo sobre un eje a una primera velocidad, y proporcionar un subsistema de accionamiento de paso que comprende un elemento de accionamiento adaptado para rotar sobre el eje independientemente del subsistema de cubo. El procedimiento incluye además las etapas de controlar, mediante un sistema de control activo, el elemento de accionamiento para rotar a una segunda velocidad, y controlar el ángulo de paso de las palas de turbina mediante el elemento de accionamiento cuando la primera velocidad es diferente de la segunda velocidad.

#### Breve descripción de los dibujos

20 Las características descritas en el presente documento podrán entenderse mejor con referencia a los dibujos descritos a continuación. Los dibujos no son necesariamente a escala, en su lugar se hace énfasis en general en ilustrar los principios de la invención. En los dibujos, se utilizan números de referencia similares para indicar partes similares en todas las diversas vistas.

25 La figura 1 representa una vista en perspectiva de una turbina eólica según una forma de realización de la presente invención;

la figura 2 representa una vista en sección transversal de una pala de turbina mostrada en la figura 1;

30 la figura 3 representa una vista en sección transversal lateral de una turbina eólica según una forma de realización de la presente invención;

la figura 4 representa una vista en perspectiva frontal de una turbina eólica según un primer ejemplo de otra forma de realización de la presente invención;

35 la figura 5 representa un segundo ejemplo de la turbina eólica mostrada en la figura 3;

la figura 6 representa un tercer ejemplo de la turbina eólica mostrada en la figura 3;

40 la figura 7 es una representación gráfica de una función de paso según una forma de realización de la presente invención;

la figura 8 es una representación gráfica de una función de potencia según una forma de realización de la presente invención;

45 la figura 9 es una representación gráfica de una medición de potencia según una forma de realización de la presente invención;

50 las figuras 10-12 son representaciones gráficas de momento de fuerza de árbol de rotor frente a velocidad del viento;

las figuras 13-15 son representaciones gráficas de potencia de turbina frente a velocidad del viento;

la figura 16 es una representación gráfica de una comparación de curva de potencia;

55 la figura 17 es una representación gráfica de AEP y coste de la turbina eólica;

las figuras 18-20 son representaciones gráficas de cargas de empuje aerodinámicas; y

60 la figura 21 es un diagrama de bloques que presenta en conjunto una forma de realización a modo de ejemplo de una turbina eólica.

#### Descripción detallada de la invención

65 El inventor de la presente invención cree que las ráfagas de viento comunes han sido en gran medida responsables del elevado índice de fracaso en las transmisiones. En parte pueden ser responsables la falta en la instalación de acoplamientos flexibles entre el árbol de rotor y el árbol de entrada de transmisión y la mala fabricación o diseño de

transmisión, sin embargo, las ráfagas de viento han exacerbado significativamente el problema. En el presente documento se da a conocer un sistema de control de paso automatizado que de manera activa gestiona la energía extraída del viento utilizando un enfoque de diseño de sistemas electromecánicos, evitando así que niveles de momento de fuerza perjudiciales entren en el sistema. Esto ocurre prácticamente para cualquier velocidad del viento, cualquier magnitud de ráfaga y cualquier duración de ráfaga.

Con referencia a la figura 1, se muestra una turbina eólica 10 según una forma de realización de la invención montada de manera rotatoria sobre una torre 12. La turbina eólica 10 incluye una pluralidad de palas de turbina 14 fijadas a un conjunto de cubo de control de paso 16 que rota sobre un eje generalmente horizontal 18. En el ejemplo ilustrado se muestran tres palas, aunque el número real puede depender de las necesidades particulares de la aplicación. El conjunto de cubo de control de paso 16 incluye un árbol de rotor acoplado a un generador eléctrico dentro de una góndola 20. La góndola 20 puede estar acoplada a la torre 12 mediante un conjunto de cojinete de guiñada pasivo o activo (no mostrado) que permite que la turbina eólica pivote sobre un eje vertical o de guiñada 22. De este modo, la turbina eólica 10 puede rotarse en la dirección del viento para obtener el mejor rendimiento. La turbina eólica 10 incluye un sistema de control de paso de pala que hace rotar las palas de turbina 14 sobre un eje de pivote 23 que, en la mayor parte de las formas de realización, es la línea central radial de la pala. La rotación sobre el eje de pivote 23 aumentará o disminuirá el ángulo de paso o el ángulo de ataque de la pala.

Con referencia a la figura 2, se muestra una vista en sección transversal de una pala de turbina 14. Como se utiliza en el presente documento, el ángulo de ataque, o ángulo de paso  $\alpha$ , se refiere al ángulo entre la cuerda de referencia 24 de la pala de turbina 14 y el vector que representa el viento en contra. La cuerda 24 se define como la recta imaginaria que une los bordes de ataque y de salida del perfil aerodinámico de pala. El sistema de control de paso de pala dado a conocer como parte de la invención en el presente documento puede disminuir rápidamente el ángulo de ataque en proporción con un aumento de la velocidad de rotación del cubo, descargando así las fuerzas o el momento de fuerza aerodinámico sobre la turbina eólica.

Pasando ahora a la figura 3, una turbina eólica 10 según una forma de realización de la presente invención incluye un sistema de control de paso automatizado que tiene un conjunto de cubo de control de paso 16, un generador con deslizamiento mejorado y un sistema de control activo adaptativo. El conjunto de cubo de control de paso 16 incluye dos subsistemas rotatorios: un subsistema de cubo rotatorio 26 y un subsistema de accionamiento de paso rotatorio 28. El subsistema de cubo 26 y el subsistema de accionamiento de paso 28 rotan independientemente, y un aumento en la velocidad de rotación del subsistema de cubo 26 en relación con la velocidad de rotación del subsistema de accionamiento de paso 28 da lugar a una reducción en el ángulo de ataque de las palas de turbina 14. De manera similar, aumentos en la velocidad de rotación del subsistema de accionamiento de paso 28 en relación con el subsistema de cubo 26 dan lugar a un aumento del ángulo de ataque de las palas de turbina 14.

En la forma de realización ilustrada en la figura 3, el subsistema de cubo 26 incluye un cubo principal rotatorio 30 que puede incluir una carcasa externa 32 que se extiende circunferencialmente por todo el conjunto de cubo de control de paso 16, un soporte de pala cilíndrico interno, que se extiende radialmente 34 rodeando la parte de accionamiento de paso de cada pala de turbina 14, y un árbol interno 36 que se extiende a lo largo del eje 18. El árbol interno 36 puede acoplarse a una caja de engranajes o a uno o varios generadores eléctricos, por ejemplo. Puede utilizarse una junta para la suciedad 40, tal como una junta tórica o un anillo elastomérico glandular, para proteger las partes rotatorias del conjunto de cubo de control de paso 16 de los contaminantes ambientales.

En una forma de realización, el subsistema de accionamiento de paso 28 puede ser un simple conjunto de engranajes cónicos accionados por un engranaje de accionamiento cónico. En un ejemplo, el subsistema de accionamiento de paso 28 incluye un engranaje de accionamiento 42 para acoplarse con el subsistema de cubo 26. En la forma de realización ilustrada, el engranaje de accionamiento 42 es un engranaje cónico soportado sobre el árbol interno 36 del subsistema de cubo 26 mediante cojinetes 44, que en un ejemplo pueden ser cojinetes de bolas, cojinetes de rodillos o casquillos. El engranaje de accionamiento 42 está acoplado a un engranaje accionado 46 que, en la forma de realización ilustrada, es uno o varios engranajes cónicos adaptados para traducir la diferencia relativa en las velocidades de rotor entre el subsistema de cubo 26 y el subsistema de accionamiento de paso 28 en un cambio en el ángulo de paso de las palas de turbina 14. Dentro del alcance de la invención se contemplan otras construcciones para acoplar el subsistema de cubo 26 al subsistema de accionamiento de paso 28, siempre que un aumento en la velocidad de rotación del cubo, en relación con el rotor de accionamiento de paso 28, dé como resultado una disminución en el ángulo de ataque de la pala de turbina.

El número de engranajes accionados 46 se determina por el número de palas que desea el diseñador. El número de palas conectadas al conjunto de cubo de control de paso 16 está limitado sólo por las limitaciones prácticas impuestas por el diseñador.

En una forma de realización, el engranaje de accionamiento 42 puede tener un engranaje asociado 48 que actúa como engranaje intermedio pero proporciona un empuje para oponerse al engranaje de accionamiento. El engranaje intermedio 48 no impone ningún momento de fuerza sobre ningún componente en el sistema sino que equilibra la carga de empuje a través del/de los engranaje(s) accionado(s) 46.

El subsistema de accionamiento de paso 28 incluye además un árbol de pala 50 que acopla el engranaje accionado 46 a la raíz de la pala de turbina 14. El árbol cilíndrico 50 puede estar soportado dentro de cada soporte de pala 34 mediante cojinetes de paso 52, tales como cojinetes de bolas, cojinetes de rodillos o casquillos. Las palas de turbina 14 pueden estar fijadas al cubo principal 30 mediante una conexión con bridas y elementos de fijación 38, por ejemplo, o mediante un árbol acanalado, o pueden ser solidarias. Cualquier rotación del engranaje de accionamiento 42 sobre el eje 18 en relación con la rotación del subsistema de cubo se traducirá en una rotación de las palas de turbina 14 sobre su eje de pivote 23 y cambiará el ángulo de ataque.

En una forma de realización, el árbol interno 36 y el engranaje de accionamiento 42 del conjunto de cubo de control de paso rotatorio 16 se adentran en la góndola 20 y se sellan mediante una junta rotatoria 54.

Como se indicó anteriormente, el conjunto de cubo de control de paso 16 incluye además un generador con deslizamiento mejorado 56. Como se utiliza en el presente documento, un generador con deslizamiento mejorado 56 es un sistema que permite que el subsistema de cubo rotatorio 26 gire más rápido que el subsistema de accionamiento de paso rotatorio 28 con el fin de reducir el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque  $\alpha$  para evitar que los niveles de momento de fuerza y de potencia superen las capacidades de la transmisión y/o el sistema de generación de potencia eléctrica. En el presente documento, a las velocidades de rotación diferenciales permitidas por el generador con deslizamiento mejorado 56 se hace referencia como "deslizamiento". En un ejemplo, un generador con deslizamiento mejorado 56 puede ofrecer una función de deslizamiento 58 de cualquier forma, desde una simple línea recta única o tan compleja como la imaginación pueda crear. La forma de la función de deslizamiento 58 debería adaptarse a las necesidades del diseño del sistema. En un ejemplo, esto permitiría muy poco deslizamiento o ningún deslizamiento cuando el sistema está funcionando dentro de sus límites de diseño para los niveles de momento de fuerza y potencia y permitiría índices de deslizamiento significativamente superiores a niveles de momento de fuerza y potencia por encima de los límites de diseño.

Las velocidades de rotación diferenciales permitidas por el generador con deslizamiento mejorado 56 (por ejemplo, deslizamiento) pueden obtenerse mediante una serie de procedimientos, y todos están contemplados dentro del alcance de la invención. En un ejemplo, el deslizamiento podría producirse mediante un embrague o una transmisión que permite que el subsistema de cubo rotatorio 26 gire más rápido cuando los niveles de momento de fuerza y/o potencia aumentan repentinamente o superan repentinamente los límites de diseño. El embrague o la transmisión podrían ser eléctricos, magnéticos, mecánicos, hidráulicos o cualquier combinación de éstos.

En otro ejemplo, el deslizamiento podría producirse mediante un generador que permite que el subsistema de cubo rotatorio 26 gire más rápido cuando los niveles de momento de fuerza y/o potencia aumentan repentinamente o superan repentinamente los límites de diseño o, como en un generador de velocidad variable, que gira más rápido cuando los niveles de momento de fuerza o potencia aumentan equiparando su funcionamiento al deslizamiento.

En otro ejemplo más, el deslizamiento podría producirse mediante un sistema de control de generador que permite que el subsistema de cubo rotatorio 26 gire más rápido cuando los niveles de momento de fuerza y/o potencia aumentan repentinamente o superan repentinamente los límites de diseño.

En un ejemplo adicional, el deslizamiento podría producirse mediante una combinación de cualquiera de los ejemplos anteriores. El número de generadores con deslizamiento mejorado 56 está limitado sólo por las limitaciones prácticas impuestas por el diseñador.

En funcionamiento, en condiciones de estado estable, el engranaje de accionamiento 42 rota de manera independiente exactamente a la misma velocidad (por ejemplo, rpm) que el subsistema de cubo 26. Cuando se impone una ráfaga de viento transitoria sobre el sistema, el engranaje de accionamiento 42 sigue rotando a la misma velocidad que durante las condiciones de estado estable. El deslizamiento en el generador con deslizamiento mejorado 56 permite que el subsistema de cubo 26 aumente en rpm con aumentos transitorios en la velocidad del viento. Cuando el subsistema de cubo 26 rota más rápido que la rotación de estado estable, el/los engranaje(s) accionado(s) 46 se obliga(n) a rotar sobre su eje, girando así las palas de turbina 14 y reduciendo el/los ángulo(s) de paso de cubo y el ángulo de ataque. Por tanto, el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque se reducen automáticamente e inmediatamente mediante el simple tren de engranajes en el subsistema de accionamiento de paso 28. Las velocidades a las que se reducen el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque son simplemente una función de la diferencia en la velocidad de rotación del subsistema de cubo 26 y la velocidad de estado estable del engranaje de accionamiento 42, y la relación de transmisión entre el engranaje de accionamiento 42 y el engranaje accionado 46. Si el deslizamiento por ejemplo ha permitido que el subsistema de cubo 26 aumente su velocidad en 1 rpm y la relación de transmisión es de 1:1, entonces el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque se reducen a 1 rpm, o una velocidad de 6 grados por segundo. Si la velocidad del viento y el subsistema de cubo 26 disminuyen debido a un valor de deslizamiento inferior en el generador con deslizamiento mejorado 56, entonces el engranaje de accionamiento 42 hará que el engranaje accionado 46 rote de modo que aumenten el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque. Pueden utilizarse relaciones de transmisión distintas de 1:1 en el subsistema de accionamiento de paso 28 para aumentar o disminuir la velocidad a la que se cambia el ángulo de ataque en función de las velocidades de rotación diferenciales de los árboles para el engranaje de accionamiento 42 y el subsistema de cubo 26 basándose en requisitos específicos del sistema. Normalmente, cuanto menores son las rpm nominales del rotor,

mayor debe ser la relación de transmisión. Por ejemplo, los sistemas muy grandes podrían girar a sólo 1-2 rpm con el fin de evitar matar a especies amenazadas de aves y murciélagos. Esto podría requerir relaciones de transmisión significativamente mayores que en el caso de un sistema con una velocidad de rotor nominal de 20 rpm, siendo así necesario el uso del equivalente de un sistema de engranajes de múltiples etapas.

Los engranajes cónicos son sólo un planteamiento que hace posible el subsistema de accionamiento de paso 28. Podrían utilizarse diferentes tipos de componentes de transmisión tales como, pero sin limitarse a, correas de transmisión o poleas, o un sistema de dispositivos hidráulicos o electromecánicos. Los medios de transmisión mediante los cuales estas velocidades de árbol están interconectadas o acopladas pueden variar siempre que los aumentos en la velocidad del árbol para el subsistema de cubo 26 en relación con la velocidad del árbol para el engranaje de accionamiento 42 den lugar a una reducción en el ángulo de ataque y los descensos en la velocidad del árbol para el subsistema de cubo 26 en relación con la velocidad del árbol para el engranaje de accionamiento 42 aumenten el ángulo de ataque.

La figura 21 es un diagrama de bloques que presenta en conjunto los elementos del sistema de control de paso automatizado como se describe en el presente documento.

Pasando ahora a las figuras 4-6, en las que se utilizan números de referencia similares para indicar partes similares con respecto a la figura 3, se muestra una turbina eólica 110 según otra forma de realización de la invención. En esta forma de realización, un sistema de control de paso automatizado incluye una conexión mecánica en lugar de un conjunto de engranajes cónicos. Un conjunto de cubo de control de paso 116 incluye dos subsistemas rotatorios: un subsistema de cubo rotatorio 126 y un subsistema de accionamiento de paso rotatorio 128. El subsistema de cubo 126 y el subsistema de accionamiento de paso 128 rotan independientemente, y un aumento en la velocidad de rotación del subsistema de cubo 126 en relación con la velocidad de rotación del subsistema de accionamiento de paso 128 da lugar a una reducción en el ángulo de ataque de las palas de turbina 114 (no mostrado).

En la forma de realización ilustrada en la figura 4, el subsistema de cubo 126 incluye un cubo principal rotatorio 130 al que están fijadas las palas de turbina 114. El cubo principal 130 puede incluir una carcasa externa 132 que se extiende circunferencialmente por todo el conjunto de cubo de control de paso 116, un soporte de pala cilíndrico interno, que se extiende radialmente 134 que rodea la parte de accionamiento de paso de cada pala de turbina 114, y un árbol externo 136 que se extiende a lo largo del eje 118. El árbol externo 136 puede acoplarse a una caja de engranajes, o a uno o varios generadores eléctricos, por ejemplo. En la forma de realización ilustrada las palas de turbina 114 pueden estar fijadas al cubo principal 130 mediante una conexión con bridas.

El subsistema de accionamiento de paso 128 incluye un árbol de accionamiento 142 en el centro del árbol externo 136 del subsistema de cubo 126. El árbol de accionamiento 142 incluye radios de accionamiento que se extienden radialmente 160 que se acoplan a una conexión mecánica 162. La conexión 162 a su vez se acopla a varillas 164 que se extienden transversalmente desde cada árbol de pala 150 alojado de manera rotatoria dentro del soporte de palas 134. Los radios 160, la conexión 162 y las varillas 164 están adaptados para rotar el ángulo de paso  $\alpha$  de las palas de turbina 114 en respuesta a una diferencia relativa en las velocidades de rotor entre el cubo principal 130 y el árbol de accionamiento 142.

La figura 4 representa la turbina eólica 110 en una condición de estado estable en la que el cubo principal 130 rota a la misma velocidad que el árbol de accionamiento 142. Una característica de tipo reloj 166 en cada reborde del árbol de pala 150 ayuda a colocar el ángulo de rotación (es decir, el ángulo de ataque  $\alpha$ ) para cada una de las palas de turbina 114.

Como se indicó anteriormente, el conjunto de cubo de control de paso 116 incluye además un generador con deslizamiento mejorado 156. Es decir, el generador con deslizamiento mejorado 156 es un sistema que permite que el subsistema de cubo rotatorio 126 gire más rápido que el subsistema de accionamiento de paso rotatorio 128 con el fin de reducir el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque  $\alpha$  para evitar que los niveles de momento de fuerza y potencia superen las capacidades de la transmisión y/o el sistema de generación de potencia eléctrica. También se incluye un componente de transmisión 178 para acoplar el subsistema de cubo rotatorio 126 al subsistema de accionamiento de paso rotatorio.

Pasando ahora a la figura 5, se muestra la rotación progresiva del árbol de accionamiento 142 en un sentido horario en relación con el árbol externo 136 del subsistema de cubo rotatorio 126. En la forma de realización ilustrada, las palas de turbina 114 están montadas para proporcionar una rotación en sentido antihorario del subsistema de cubo 126 con la fuerza del viento. Por tanto, cuando una ráfaga de viento obliga a un aumento en la velocidad de rotación del subsistema de cubo rotatorio 126 y el subsistema de accionamiento de paso rotatorio 128 no aumenta su velocidad de rotación, la diferencia relativa entre ambos mueve la conexión 162 como se muestra. Según rotan los radios de accionamiento 160, los rebordes sobre los que están montadas las palas de turbina se obligan a rotar tal como se define mediante la geometría de la conexión 162, dando como resultado una rotación en sentido horario del árbol de accionamiento 142 y una reducción en el ángulo de ataque  $\alpha$ .

Independientemente de que las palas de turbina 114 estén montadas de modo que produzcan una rotación en sentido antihorario del subsistema de cubo 126 con la fuerza del viento, o una rotación en sentido horario del subsistema de cubo 126, el conjunto de cubo de control de paso 116 proporciona el mismo resultado. Pasando a la figura 6, se muestra la rotación progresiva del árbol de accionamiento 142 en un sentido antihorario en relación con el árbol externo 136 del subsistema de cubo rotatorio 126. En la forma de realización ilustrada, las palas de turbina 114 están montadas para proporcionar una rotación en sentido horario del subsistema de cubo 126 con la fuerza del viento. Por tanto, cuando una ráfaga de viento obliga a un aumento en la velocidad de rotación del subsistema de cubo rotatorio 126 y el subsistema de accionamiento de paso rotatorio 128 no aumenta su velocidad de rotación, la diferencia relativa entre ambos mueve la conexión 162 como se muestra. Según rotan los radios de accionamiento 160, los rebordes sobre los que están montadas las palas de turbina se obligan a rotar tal como se define mediante la geometría de la conexión 162, dando como resultado una rotación en sentido antihorario del árbol de accionamiento 142 y una reducción en el ángulo de ataque  $\alpha$ .

A diferencia del sistema de control de paso de engranaje cónico 16 dado a conocer con referencia a la figura 3, una conexión mecánica 162 similar a la dada a conocer con referencia a las figuras 4-6 no tiene una relación de transmisión constante, debido a la geometría de la conexión. La relación de transmisión variable puede utilizarse en beneficio del diseñador para ligeras reducciones en los requisitos de par motor de paso en determinadas condiciones transitorias.

El término 'deslizamiento' también se utiliza comúnmente para definir un fenómeno encontrado en los generadores de inducción de jaula de ardilla convencionales, de bajo coste. Por motivos de claridad, este fenómeno se denominará en el presente documento 'deslizamiento electromagnético'. Un generador de inducción no puede crear potencia a menos que el campo magnético del rotor gire más rápido que el campo eléctrico del estátor. Cuanto mayor es la diferencia en las velocidades de rotación (por ejemplo, deslizamiento electromagnético), mayor es la potencia de salida. Los generadores convencionales de alta eficiencia encontrados comúnmente en la industria actual ofrecen un deslizamiento electromagnético de aproximadamente el 3% a máxima potencia nominal. Dicho de otro modo, si un generador genera una potencia a 60 Hz y su velocidad nominal de funcionamiento es de 900 rpm, el deslizamiento electromagnético es la diferencia entre las 900 rpm (rpm síncronas) del campo eléctrico rotatorio en el estátor y las rpm reales del árbol del rotor. Más específicamente, para el ejemplo del deslizamiento electromagnético del 3%, a máxima potencia nominal, el estátor produciría un campo eléctrico con una rotación a 900 rpm y el rotor (por ejemplo, árbol de generador) rotaría a 927 rpm. De hecho, el deslizamiento electromagnético es lo que proporciona el momento de fuerza reactivo adicional al generador puesto que los campos magnéticos en el rotor atraviesan los campos eléctricos del estátor a velocidades superiores. Cuando el momento de fuerza sobre el árbol de entrada del generador se aproxima a cero, la velocidad del rotor se aproxima a las rpm síncronas de 900. Por tanto, el deslizamiento electromagnético cambia según sea necesario para crear el momento de fuerza requerido por el generador para coincidir con la salida de momento de fuerza de las palas de turbina. En general, los diseñadores intentan minimizar en parte el deslizamiento electromagnético porque el deslizamiento electromagnético genera calor en el generador, lo que supone un desperdicio de energía. Los generadores de alta eficiencia tienen índices de deslizamiento electromagnético muy bajos, y como tal casi toda la potencia del árbol de entrada se convierte en potencia eléctrica y muy poca se pierde en forma de calor. El índice de deslizamiento electromagnético, o 'función de deslizamiento' como se utiliza en el presente documento, es casi una línea recta para muchos generadores dentro del rango de capacidad de potencia nominal y sigue como línea recta hasta bien pasada la capacidad de potencia nominal del generador.

Un generador con deslizamiento mejorado permite cambios en la velocidad de rotación del árbol para el subsistema de cubo rotatorio puesto que se cambian los niveles de potencia o niveles de entrada de momento de fuerza en el generador con deslizamiento mejorado. La función de deslizamiento podría ser una línea recta con una pendiente constante seleccionada por el diseñador, o podría ser una función ligeramente más compleja tal como dos líneas rectas conectadas con diferentes pendientes. La complejidad de la función de deslizamiento depende de las necesidades del sistema y los objetivos del diseñador. El inventor de la presente invención ha encontrado que una función de deslizamiento relativamente simple puede satisfacer las necesidades del diseño de la turbina eólica utilizando sólo dos líneas rectas. En una forma de realización, se utilizó un generador de ocho polos con una velocidad síncrona de 900 rpm. Como las velocidades del viento proporcionan suficiente potencia para aproximarse a la máxima potencia nominal del generador, su deslizamiento permite que la velocidad del árbol se aproxime a 927 rpm. Por tanto, la primera línea recta en la función de deslizamiento es la del generador convencional de alta eficiencia con un índice de deslizamiento electromagnético del 3%. Si la turbina eólica funcionara a máxima potencia nominal y una ráfaga de viento aumentara además momentáneamente los niveles de momento de fuerza en el árbol de entrada del generador, las rpm pasarían a ser mayores de 927 rpm. En este momento, la función de deslizamiento sigue una segunda línea con una pendiente diferente a la pendiente del 3%. La segunda línea permite que las rpm se deslicen a 927 rpm a máxima potencia nominal y hasta 971 rpm al 125% de la máxima potencia nominal, por ejemplo. Este deslizamiento mejorado permite un deslizamiento adicional de 44 rpm con sólo un aumento del 25% en potencia aunque sólo eran necesarias 27 rpm de deslizamiento desde cero hasta el 100% de la potencia. El modo de funcionamiento de deslizamiento electromagnético mejorado permite aproximadamente 6,5 veces el deslizamiento electromagnético en el intervalo de deslizamiento electromagnético mejorado comparado con el deslizamiento electromagnético dentro del intervalo de operación de cero a la máxima potencia nominal. En condiciones cercanas a la potencia nominal máxima este deslizamiento electromagnético mejorado permite que el

5 cubo rotatorio aumente repentinamente su velocidad en respuesta a un aumento repentino en la velocidad del viento, realizando así una reducción repentina en el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque gracias al conjunto de cubo de control de paso. Como se reducen el ángulo de paso de cubo y el ángulo de ataque, disminuyen los niveles de momento de fuerza de entrada y los niveles de potencia pueden avanzar hacia el rango de funcionamiento normal con los niveles de deslizamiento electromagnético normales.

10 Se contemplan muchos tipos de configuraciones de generador dentro del alcance de la invención. El generador con deslizamiento mejorado puede ser cualquier tipo o configuración de generador, siendo un requisito que permita aumentar las rpm del subsistema de cubo rotatorio a medida que aumenta la salida de momento de fuerza en el intervalo de potencia de interés. El generador de inducción de jaula de ardilla a modo de ejemplo es uno de los tipos más comunes debido a su bajo coste, alta fiabilidad y fabricación simple. Sin embargo, los generadores pueden diseñarse y fabricarse con una variedad de funciones de deslizamiento o componentes adicionales y puede proporcionarse un sistema de control de generador para crear la función de deslizamiento deseada para obtener un rendimiento del sistema satisfactorio.

15 En una forma de realización, puede modificarse un generador de inducción de jaula de ardilla de alta eficiencia convencional para cambiar sus propiedades de deslizamiento electromagnético a medida que se aproxima a la máxima potencia nominal. Aunque las propiedades de deslizamiento electromagnético pueden cambiarse según el diseño dentro del generador, también pueden crearse mediante un sistema de control de generador. Un enfoque de este tipo podría ser un operador de generador 'inteligente'. El operador de generador inteligente podría ser, por ejemplo, un dispositivo que pudiera encender o apagar la alimentación al generador cada vez que la onda de potencia CA cruza la línea de corriente o de tensión cero. Por tanto, con una potencia a 60 Hz el operador de generador inteligente podría encender o apagar la alimentación con una frecuencia de 120 veces por segundo. Cuando se apaga o "corta" la alimentación, el rotor puede ir a "marcha libre" o acelerar porque no tiene el campo eléctrico del estátor para retenerlo. Esto crea un modo de funcionamiento de deslizamiento electromagnético mejorado. Puede cortarse cualquier número de ondas de potencia entre 0 y 120 cada segundo dentro del ciclo de potencia de 60 Hz. Pueden utilizarse transductores de velocidad para medir la velocidad del generador (rpm) y pueden utilizarse transductores de corriente para medir la salida del generador en unidades de amperios. El proceso de corte secuencialmente corta cada vez más formas de onda de la onda de potencia de modo que al 125% de la potencia nominal, se permite que la velocidad del rotor aumente su deslizamiento electromagnético de 927 rpm a 971 rpm. En el ejemplo dado a conocer, si el generador con deslizamiento mejorado funciona con 240 voltios de potencia monofásica, su salida de corriente podría ser de aproximadamente 44 amperios a máxima potencia nominal y de aproximadamente 55 amperios al 125% de máxima potencia nominal. Si las rpm aumentaran de 927 a 971 rpm, entonces el operador de generador inteligente permitiría un aumento del deslizamiento electromagnético a una tasa de 4 rpm/amperio entre el 100 y el 125% de máxima potencia nominal. Este deslizamiento electromagnético mejorado es significativamente mayor que las 0,61 rpm/amperio de deslizamiento electromagnético a niveles de potencia por debajo del 100% de la potencia nominal.

40 El operador de generador inteligente podría ser cualquier dispositivo que permitiera un modo de funcionamiento de deslizamiento mejorado y este modo de deslizamiento mejorado podría comenzar y finalizar con cualquier porcentaje de la potencia nominal del generador con deslizamiento mejorado y ofrecer cualquier nivel de deslizamiento deseado por el diseñador.

45 Como se indicó anteriormente, el sistema de control de paso automatizado incluye además un sistema de control activo adaptativo 68. El sistema de control activo adaptativo 68 puede comprender dos componentes: un sistema de control activo convencional 70 y una función de control adaptativa 72. El sistema de control activo 70 puede mejorar la regulación de potencia durante las condiciones transitorias complementando las acciones llevadas a cabo por el conjunto de cubo de control de paso 16 y el generador con deslizamiento mejorado 56. La función de control adaptativa 72 puede mejorar el rendimiento a largo plazo de la turbina eólica reduciendo el impacto de los errores de sensor.

50 Como un sistema de control activo necesita tiempo para responder correctamente, el sistema de control de paso automatizado dado a conocer en el presente documento puede permitir que el conjunto de cubo de control de paso 16 domine el control del ángulo de paso  $\alpha$  durante las condiciones transitorias de corta duración, y que un sistema de control activo 70 complemente su respuesta. Debido al tiempo requerido para obtener buenos datos sobre lo que ocurre físicamente en el sistema, el sistema de control activo 70 debe basarse en el conjunto de cubo de control de paso 16 para empezar a realizar correcciones del ángulo de ataque  $\alpha$  durante una ráfaga de viento transitoria mientras se prepara para hacer un cambio en su ángulo de paso ordenado. El tiempo requerido para preparar una orden de paso significativamente diferente con respecto a lo que existía antes de que comenzara la ráfaga de viento transitoria puede durar 50-1000 milisegundos, y entonces el sistema de control activo 70 puede empezar a hacer correcciones basándose en datos "antiguos". No obstante, el sistema de control activo 70 puede ofrecer mejoras significativas en la respuesta del sistema global cuando se examina por un intervalo de tiempo de 5 o 10 segundos. Datos útiles para el sistema de control activo 70 pueden ser, por ejemplo, la velocidad del subsistema de cubo rotatorio 26, la velocidad del subsistema de accionamiento de paso rotatorio 28, el ángulo de paso de cubo real, el ángulo de paso de cubo deseado, la potencia de salida del generador, la velocidad en rpm del generador, la velocidad del viento, y la primera, segunda, tercera derivadas y derivadas superiores de estas variables así como

5 varias combinaciones de estas variables. El inventor ha encontrado que el uso de datos de la velocidad del subsistema de cubo rotatorio 26 en relación con la velocidad del subsistema de accionamiento de paso rotatorio 28, el ángulo de paso de cubo real en relación con el ángulo de paso de cubo deseado, y la aceleración angular del subsistema de cubo rotatorio 26 daba resultados excelentes a la hora de complementar la respuesta del conjunto de cubo de control de paso 16 a una condición de ráfaga de viento transitoria.

10 En condiciones de estado moderadamente estables en las que el valor de deslizamiento del generador con deslizamiento mejorado 56 es casi constante, el conjunto de cubo de control de paso 16 no cambia significativamente el ángulo de paso  $\alpha$ , y el sistema de control activo 70 domina el control del ángulo de paso.

15 El sistema de control activo adaptativo 68 ajusta el ángulo de paso de cubo cambiando la velocidad del subsistema de accionamiento de paso rotatorio 28. Cuando la velocidad del subsistema de accionamiento de paso rotatorio 28 es menor que la velocidad rotatoria del subsistema de cubo 26, el ángulo de paso  $\alpha$  disminuye. De manera similar, cuando el subsistema de accionamiento de paso 28 rota más rápido que el subsistema de cubo rotatorio 26 el ángulo de paso  $\alpha$  aumenta.

20 Un sistema de control de paso ideal conseguiría ángulos de paso óptimos para cada velocidad del viento para maximizar la producción anual de energía. Normalmente, esto se intenta mediante un sistema de control activo que utiliza sensores para los ángulos de paso y un anemómetro para medir la velocidad del viento, y en algunos casos una base de datos predefinida que identifica los ángulos de paso óptimos en función de la velocidad del viento. Desafortunadamente, estos dos sistemas de detección, incluyendo la base de datos predefinida, están llenos de errores y, por tanto, no pueden ofrecer por sí mismos la producción anual máxima de energía para el sistema.

25 Además de las imprecisiones inherentes a los anemómetros debidas a errores de sesgo, errores de factor de escala, efectos de sombra por palas pasantes, y vórtices locales, también hay que tener en cuenta el hecho de que el punto en el que se mide la velocidad del viento no es una representación precisa de la velocidad real del viento para todas las secciones del elemento de pala. A lo largo del diámetro del rotor hay gradientes en la velocidad del viento, y donde se sitúe cada rotor dentro de ese gradiente determinará su potencia de salida disponible. Este gradiente de velocidad del viento puede cambiar según la estación como, por ejemplo, cuando las hojas caen de los árboles en otoño y las velocidades del viento cerca del suelo aumentan en relación con las velocidades del viento más arriba. La única suposición válida que se puede hacer con respecto a la medición de la velocidad del viento es que el valor es incorrecto. Sin embargo, es razonable suponer que los errores serán relativamente constantes durante breves periodos de tiempo. Por tanto, un sistema de control debería poder corregir las salidas del sensor de viento basándose en entradas de sensor erróneas, pero al menos repetibles.

35 Los sensores que miden el ángulo de paso  $\alpha$  tienen una serie similar de deficiencias. Además de los errores de sesgo y de factor de escala también tienen errores inherentes al paso de pala real frente al paso de pala supuesto, debido a tolerancias mecánicas y al hecho de que la torsión en la pala puede cambiar en función de la velocidad del viento. De nuevo, la única suposición válida que puede hacerse es que las mediciones de paso son incorrectas, aunque estos errores serán relativamente constantes durante breves periodos de tiempo. Por tanto, un sistema de control debería poder corregir las mediciones del ángulo de paso basándose en entradas de sensor erróneas pero repetibles.

45 A diferencia de un sistema de control activo que supone que todos los valores de sensor son correctos, una función de control adaptativa supone que todos los valores de sensor son incorrectos, y entonces compensa, y esencialmente corrige, los errores tanto en el sensor de velocidad del viento como en los sensores de paso. Con el fin de conseguir esto, debe hacerse una simple suposición: mientras que la magnitud de los errores de sensor sea desconocida, los errores serán repetibles, y serán constantes a corto plazo, y mientras que pueden cambiar con el tiempo, el sistema puede cambiar los datos en su base de datos a una velocidad significativamente mayor de lo que pueden cambiar los errores. En una forma de realización, esta base de datos variable puede almacenarse en una función de paso 74. En esta aplicación particular, la función de paso 74 es una base de datos que contiene datos que definen el ángulo de paso  $\alpha$  medido óptimo a cualquier velocidad del viento medida que proporcionará la potencia de salida deseada máxima. La figura 7 ilustra gráficamente una función de paso 74 según una forma de realización de la presente invención.

55 Además de la función de paso 74, la función de control adaptativa 72 también requiere una función de potencia 76 para almacenar niveles de potencia registrados históricamente a varias velocidades del viento. La figura 8 ilustra gráficamente una función de potencia 76 según una forma de realización de la presente invención.

60 Por encima de cierta velocidad del viento, las palas de turbina producirán más potencia que los límites de diseño para el sistema. A y por encima de esta velocidad del viento, los ángulos de paso óptimos se definirán como aquellos que limitan la potencia a los límites de diseño del sistema. La función de paso 74 puede establecerse inicialmente basándose en parámetros de diseño, aunque su forma se modificará mediante la función de control adaptativa 72 para compensar errores en las velocidades del viento medidas y los ángulos de paso medidos. La función de control adaptativa 72 puede evaluar continua o periódicamente la precisión de la función de paso 74 a

cualquier velocidad del viento a la que funciona. Si la turbina eólica puede producir más potencia aumentando ligeramente el ángulo de paso  $\alpha$ , la función de paso 74 puede ajustarse mediante la función de control adaptativa 72. Si el aumento del ángulo de paso  $\alpha$  reduce la potencia cuando se busca un aumento, la función de paso 74 puede corregirse de nuevo mediante la función de control adaptativa 72. De manera similar, si la disminución del ángulo de paso  $\alpha$  reduce o aumenta la potencia, la función de paso 74 puede cambiarse de manera correspondiente. Por tanto, cambiando ligeramente el ángulo de paso  $\alpha$  con respecto a lo que la función de paso 74 predice como óptimo para una velocidad del viento medida dada, y a continuación consultando la función de potencia 76 para ver si la potencia de salida aumenta o disminuye en relación con lo que había anteriormente en la base de datos, es posible ajustar la función de paso 74 según sea necesario para proporcionar un rendimiento óptimo. Pueden desarrollarse e implementarse diversos algoritmos en la función de control adaptativa 72 para permitir que el sistema encuentre y establezca cada punto de datos en la función de paso 74 que ofrezca el mayor rendimiento de potencia para la función de potencia 76. Este proceso puede repetirse tanto como desee el diseñador para refinar y ajustar la función de paso 74 para adaptar los cambios a corto y largo plazo en el rendimiento del sistema. El número de puntos de datos y el intervalo de velocidades del viento utilizados para definir la función de potencia 76 son a discreción del diseñador. Como la velocidad del viento es raramente constante durante tal evaluación y el ajuste asociado supone una velocidad del viento fija, el error inducido por las variaciones en la velocidad del viento durante la evaluación actúa como ruido de alta frecuencia, permitiendo que el sistema encuentre iterativamente los puntos operativos casi óptimos. Aunque este enfoque puede no ofrecer los valores óptimos absolutos teóricamente para el rendimiento, se aproximará a esos valores máximos con una precisión mucho mejor que cualquier conjunto predefinido de parámetros que podría desarrollarse.

El diseñador puede elegir tantos puntos como desee para la definición de la función de paso 74 para establecer la resolución deseada. Con referencia de nuevo a la figura 7, la función de paso 74 ilustrada utiliza 70 puntos de datos de 5 mph a 75 mph en incrementos de 1 mph. El número de puntos de datos y el intervalo de velocidades del viento utilizados para definir la función de paso 74 son a discreción del diseñador. Es importante reconocer que hay muchos medios para medir los niveles de potencia tanto directa como indirectamente y todos tendrán varios niveles de errores. Sin embargo, no es importante una precisión absoluta del nivel de potencia medido siempre que sea repetible, sus errores cambien lentamente a lo largo del tiempo y cualquier falta de linealidad en su precisión no cree una duplicidad.

Como la función de paso 74 define los ángulos de paso medidos a velocidades del viento medidas que ofrecen el mejor rendimiento, ahora hay una función de control adaptativa 72 que puede utilizar el sistema de control activo 70 para crear órdenes de paso óptimas a cualquier velocidad del viento medida. Los errores en las mediciones de la velocidad del viento y los ángulos de paso están incluidos en la función de paso 74. Por tanto, si un sistema que funciona con una velocidad del viento de 12 mph funciona teóricamente mejor con un ángulo de paso de  $16^\circ$  pero los errores en las entradas de sensor miden la velocidad del viento como de 14 mph y el ángulo de paso como de  $15^\circ$ , no tiene por qué importar. La función de paso 74 sabe que cuando la velocidad del viento medida es de 14 mph, un ángulo de paso medido de  $15^\circ$  ofrece el mejor rendimiento. Ya sea la predicción teórica equivocada, o los sensores se equivoquen, o una combinación de ambos, lo único importante es que el sistema cambie el paso al ángulo de paso medido erróneamente deseado basándose en la función de paso 74 para maximizar el rendimiento a cualquier velocidad del viento medida erróneamente dada y nivel de potencia medido erróneamente.

La función de paso 74 puede utilizarse para hacer funcionar una única turbina eólica o múltiples turbinas eólicas. Igual que en una única turbina eólica, la función de paso 74 puede utilizarse para controlar docenas o cientos de turbinas eólicas simultáneamente promediando el rendimiento de algunas o todas ellas y creando una función de potencia 76 y función de paso 74 promedio. Esto puede ser útil en aplicaciones en las que el coste para uno o varios sistemas de control central es menor que muchos más sistemas de control independientes.

En otra forma de realización de la presente invención, un sistema de control activo adaptativo 68 puede utilizar dos puntos de datos de funcionamiento para detectar y corregir errores de sensor. En un ejemplo, los primeros de los dos puntos son la velocidad del viento medida y el ángulo de paso medido en los que el sistema puede empezar a producir un nivel de potencia aceptable. El segundo punto puede ser la velocidad del viento medida y el ángulo de paso medido en los que el sistema empieza a reducir el ángulo de ataque y la potencia de salida total porque el sistema de pala puede producir demasiada potencia. Cada uno de estos dos puntos tiene una velocidad del viento medida y un ángulo de paso medido asociados (ambos erróneos), aunque son únicos porque en un punto el sistema puede producir potencia suficiente para garantizar el funcionamiento y en el otro punto el sistema puede producir demasiada potencia. El diseñador puede reconocer que en determinadas condiciones transitorias una potencia de salida óptima absoluta entre estos dos puntos puede producir inestabilidades aerodinámicas cuando las palas se hacen funcionar demasiado cerca de su ángulo de ataque máximo  $\alpha$  para una producción de potencia máxima. Por tanto, el diseñador puede definir una función matemática tal como una línea recta o alguna otra forma con lo que entre estos dos puntos de funcionamiento el sistema de control seguirá un conjunto predefinido de ángulos de paso basándose en los valores en los dos puntos finales medidos. Por ejemplo, si el sistema empezó produciendo potencia a una velocidad del viento medida de 5 mph y el mejor ángulo de paso medido en ese punto fue de 5 grados, y a una velocidad del viento medida de 15 mph el sistema alcanza niveles de potencia máximos con un ángulo de paso medido de -10 grados, entonces a velocidades del viento medidas entre estos dos puntos el sistema

de control define un ángulo de paso a velocidades del viento medidas entre los dos puntos finales conocidos. Esta relación podría definirse como una línea recta entre los dos puntos finales que comienza con +5 grados a 5 mph y disminuye con un cambio de  $(5^\circ - (-15^\circ)) / (5 \text{ mph} - 15 \text{ mph})$  o  $-1,5^\circ/\text{mph}$  en la velocidad del viento medida. Podría utilizarse una línea parabólica o cualquier forma de línea deseada por el diseñador. El aspecto más importante es definir los dos puntos finales en los que pueden definirse valores medibles y ajustar la función de paso 74 de manera correspondiente para mantener una alta producción de energía entre estos dos puntos finales a medida que los errores de sensor cambian con el tiempo.

Ejemplo 1: Vida útil de transmisión más larga

Como se indica en el presente documento, el sistema de control de paso automatizado dado a conocer gestiona activamente la energía extraída del viento utilizando un enfoque de diseño de sistemas electromecánicos, evitando así que niveles de momento de fuerza perjudiciales entren en el sistema. Esto ocurre prácticamente para cualquier velocidad del viento, cualquier magnitud de ráfaga y cualquier duración de ráfaga. Las figuras 10-12 representan gráficamente niveles de momento de fuerza que pueden esperarse en un diseño de turbina de 15 kW de alto rendimiento con un control de paso activo convencional (sin sistema APC) y la misma turbina con el sistema de control de paso automatizado (sin sistema APC). En la figura 10, la velocidad del viento empieza con un valor de estado estable de 12 mph y llega a su máximo de 24 mph 3 segundos después para volver a su valor de estado estable. Durante este estadio transitorio, el sistema de control de paso automatizado gestiona la tasa de extracción de energía eólica, manteniendo siempre el nivel de momento de fuerza por debajo de la línea roja de 7000 pies-libras. Un sistema convencional simplemente no puede responder lo suficientemente rápido para ofrecer este nivel de regulación de momento de fuerza, y como resultado impone niveles de momento de fuerza transitorios por encima del límite de diseño para la transmisión. En la figura 11, la velocidad del viento empieza con un valor de estado estable de 20 mph y llega a su máximo de 35 mph 3 segundos después para volver a su valor de estado estable. En la figura 12, la velocidad del viento empieza con un valor de estado estable de 30 mph y llega a su máximo de 50 mph 3 segundos después para volver a su valor de estado estable.

Ejemplo 2: Vida útil de generador e inversor más larga

La regulación de potencia es también un parámetro importante de valor. Las sobrecargas eléctricas transitorias acortan la vida útil de los devanados del estátor, aparellaje eléctrico e inversores. El coste para fabricar el sistema de control de paso automatizado dado a conocer en el presente documento es menor que la mitad del coste de un inversor, y el diseño permite además el uso de un generador de inducción de jaula de ardilla de bajo coste en lugar de generadores caros de imanes permanentes de tierras raras, ofreciendo ahorros adicionales. Además, el diseño alcanza un control de paso automático sin precedentes, más una producción anual de energía significativamente mayor.

Como las tecnologías de turbinas actuales toman los principales recursos eólicos del mundo, deben desarrollarse procedimientos para extraer energía de recursos eólicos menos atractivos. Esto requerirá probablemente diseños de perfil aerodinámico más grandes. Cuanto más grande es un perfil aerodinámico, más difícil es regular la potencia en condiciones de viento transitorias.

Se desarrolló una forma de realización del sistema de control de paso automatizado para un perfil aerodinámico de alto rendimiento propietario con coeficientes de sustentación aproximadamente el doble de aquellos utilizados en las tecnologías de turbina actuales. Acoplado con un diámetro de rotor grande para un diseño de 15 kW, era necesaria una tecnología avanzada de control de paso. Además, el subsistema de cubo sólo rota a aproximadamente 20 rpm, lo que requiere mayores cambios de ángulo de paso en función de la velocidad del viento que las configuraciones con rpm superiores.

Las figuras 13-15 ilustran gráficamente las sobrecargas eléctricas transitorias absorbidas por el motor/inversor en el diseño de turbina propietario con el control de paso automático convencional (sin sistema APC), y con el sistema de control de paso automatizado dado a conocer (con sistema APC). La línea de trazos cortos (daño de motor/inversor) ilustra la potencia máxima que puede obtenerse del generador en condiciones transitorias sin daño. En las tres condiciones, los componentes en el sistema de control de paso automático convencional sufrieron transitorios de potencia muy por encima del umbral de diseño, mientras que la potencia obtenida del sistema de control de paso automatizado de la invención permaneció por debajo del umbral.

Ejemplo 3: Producción anual de energía

En última instancia, la producción anual real de energía es el gancho comercial más importante de cualquier diseño de turbina. El diseño de turbina eólica dado a conocer en el presente documento tiene niveles de potencia bastante altos a bajas velocidades del viento, y limita los niveles de potencia a mayores velocidades del viento. Cuando los costes de fabricación, instalación, funcionamiento y mantenimiento se compensan con la producción anual de energía, un diseño de turbina que ofrece un gran rendimiento en condiciones de viento menos que óptimas se vuelve muy significativo.

Sin embargo, un sistema de control de paso avanzado debería hacer algo más que sólo regular la potencia y el momento de fuerza. Debería maximizar la producción anual de energía. Esto no puede conseguirse con las tecnologías actuales porque las tecnologías de control de paso actuales suponen que los valores de entrada de sensor son correctos. Como se indica en el presente documento, ésta no es una suposición válida.

Un sistema de control de paso ideal conseguiría ángulos de paso óptimos para cualquier velocidad del viento para maximizar la producción anual de energía. Normalmente esto se intenta utilizando sensores para ángulos de paso y guiñada, un anemómetro para medir la velocidad del viento, y posiblemente una base de datos predefinida que identifica ángulos de paso óptimos en función de la velocidad del viento. Desafortunadamente, estos sistemas de detección incluyendo la base de datos predefinida están llenos de errores y, por tanto, no pueden ofrecer por sí mismos la producción anual máxima de energía para el sistema.

Además de las imprecisiones inherentes a los anemómetros debidas a errores de sesgo, errores de factor de escala, efectos de sombra impuestos por palas pasantes, y vórtices locales, también hay que tener en cuenta el hecho de que el punto en el que se mide la velocidad del viento no es una representación precisa de la velocidad real del viento para todas las secciones del elemento de pala. A lo largo del diámetro del rotor hay gradientes en la velocidad del viento, y donde se sitúe cada rotor dentro de ese gradiente determinará su potencia de salida disponible. La única suposición válida que se puede hacer con respecto a la medición actual de la velocidad del viento es que el valor es incorrecto.

Los sensores que miden los ángulos de paso tienen una serie similar de deficiencias. Además de los errores de sesgo y de factor de escala también tienen errores inherentes al paso de pala real frente al paso de pala supuesto, debido a tolerancias mecánicas y al hecho de que la torsión en la pala puede cambiar en función de la velocidad del viento. De nuevo, la única suposición válida que puede hacerse es que las mediciones de paso son incorrectas.

Además de errores de sensor presentes el primer día de funcionamiento, es razonable esperar que estos errores cambien con el tiempo por un deterioro del sensor, deriva electrónica, y cambios de la temperatura y densidad del aire según la estación.

El sistema de control de paso automatizado dado a conocer supone que todas las entradas de sensor son incorrectas, corrige constantemente los sensores, y proporciona niveles de potencia máximos todo el año, año tras año. La figura 16 ilustra una gráfica comparativa de la curva de potencia para diversos diseños de turbina pequeños, comercialmente disponibles en el primer día de funcionamiento en relación con el diseño de 15 kW dado a conocer (WKT) con el sistema de control de paso automatizado. Como se indica, el diseño WKT alcanza la potencia nominal a una velocidad del viento inferior que los otros diseños, de modo que puede extraer más energía eólica en los regímenes de velocidad del viento inferiores. La figura 17 ilustra gráficamente la producción anual de energía (AEP) para cada una de las turbinas eólicas en la figura 16. Aunque el diseño WKT (Wind King) limite la potencia de salida a 15 kW, su producción anual de energía es mucho mayor, llevando a una mejor propuesta de valor.

#### Ejemplo 4: Magnitudes reducidas en variaciones de empuje transitorias

Una turbina eólica ideal produciría un empuje constante a todas las velocidades del viento y condiciones de ráfaga por encima de su límite de potencia máximo. El sistema de control de paso automatizado dado a conocer reduce significativamente las variaciones de empuje en condiciones de viento transitorias, aunque en la actualidad no puede eliminarlas. Las figuras 18-20 ilustran gráficamente cargas de empuje sobre las palas de rotor en tres condiciones de viento transitorias diferentes. La reducción del ángulo de ataque a tiempo durante las condiciones de viento transitorias reduce la resistencia sobre los perfiles aerodinámicos al tiempo que se reducen los niveles de momento de fuerza y potencia de salida. Aunque los empujes sobre el monopolo y la góndola no están incluidos en las gráficas de empuje, la carga de empuje total tendría una menor variación si estuvieran incluidos porque el empuje sobre el monopolo y la góndola aumentaría mientras disminuye el empuje sobre los perfiles aerodinámicos. Las cargas de empuje reducidas pueden ofrecer el potencial para reducir los costes de torre, que son una de las partidas presupuestarias individuales más grandes en cuanto a coste para una turbina eólica. Esta reducción del empuje también puede ser de interés para sistemas basados en plataformas de aguas profundas en alta mar que son mucho menos tolerantes a las condiciones de viento transitorias.

El sistema de control de paso automatizado dado a conocer es simple desde el punto de vista electromecánico, ofrece reducciones significativas en el coste de fabricación total, y ofrece una regulación de potencia y control de paso sin precedentes permitiendo al mismo tiempo los siguientes beneficios: vida útil de transmisión más larga; vida útil de generador e inversor más larga; producción anual de energía significativamente mayor; magnitudes reducidas en las variaciones de empuje transitorias; palas significativamente más grandes con mayores diámetros de rotor de barrido; diseños a bajas rpm seguros para aves y murciélagos que no matan a las especies amenazadas; diseños mejorados a baja velocidad del viento para ubicaciones con recursos eólicos limitados; producción de potencia más uniforme para una mejor utilización de la red eléctrica; y una regulación significativamente mejorada de momento de fuerza y potencia de salida. Se espera que el sistema de control de paso automatizado dado a conocer ahorre a fabricantes y clientes entre 50.000 \$ y 100.000 \$ por megavatio por año. Aunque el sistema de control de paso

automatizado dado a conocer estaba previsto principalmente para su uso con turbinas eólicas de velocidad fija, también puede utilizarse con turbinas eólicas de velocidad variable.

5 Aunque la presente invención se ha descrito con referencia a varias formas de realización específicas, se entenderá que el espíritu y alcance real de la invención se determinarán sólo con respecto a las reivindicaciones respaldadas por la presente memoria descriptiva. Además, aunque en numerosos casos en el presente documento se describen sistemas y aparatos y procedimientos teniendo un determinado número de elementos se entenderá que tales sistemas, aparatos y procedimientos pueden ponerse en práctica con menos elementos que el determinado número mencionado. Además, aunque se han descrito una serie de formas de realización particulares, se entenderá que  
10 pueden utilizarse características y aspectos que se han descrito con referencia a cada forma de realización particular con cada forma de realización restante descrita particularmente.

15 Como las tecnologías de turbinas actuales toman los principales recursos eólicos del mundo, deben desarrollarse procedimientos para extraer energía de recursos eólicos menos atractivos. Esto requerirá probablemente diseños de perfil aerodinámico más grandes. Cuanto más grande es un perfil aerodinámico, más difícil es regular la potencia en condiciones de viento transitorias.

20 Se desarrolló una forma de realización del sistema de control de paso automatizado para un perfil aerodinámico de alto rendimiento propietario con coeficientes de sustentación aproximadamente el doble de aquellos utilizados en las tecnologías de turbina actuales. Acoplado con un diámetro de rotor grande para un diseño de 15 kW, era necesaria una tecnología avanzada de control de paso. Además, el subsistema de cubo sólo rota a aproximadamente 20 rpm, lo que requiere mayores cambios de ángulo de paso en función de la velocidad del viento que las configuraciones con rpm superiores.

25 Las figuras 13-15 ilustran gráficamente las sobrecargas eléctricas transitorias absorbidas por el motor/inversor en el diseño de turbina propietario con el control de paso automático convencional (sin sistema APC) y con el sistema de control de paso automatizado dado a conocer (con sistema APC). La línea de trazos cortos (daño de motor/inversor) ilustra la potencia máxima que puede obtenerse del generador en condiciones transitorias sin daño. En las tres condiciones, los componentes en el sistema de control de paso automático convencional sufrieron transitorios de potencia muy por encima del umbral de diseño, mientras que la potencia obtenida del sistema de control de paso  
30 automatizado de la invención permaneció por debajo del umbral.

#### Ejemplo 3: Producción anual de energía

35 En última instancia, la producción anual real de energía es el gancho comercial más importante de cualquier diseño de turbina. El diseño de turbina eólica dado a conocer en el presente documento tiene niveles de potencia bastante altos a bajas velocidades del viento, y limita los niveles de potencia a mayores velocidades del viento. Cuando los costes de fabricación, instalación, funcionamiento y mantenimiento se compensan con la producción anual de energía, un diseño de turbina que ofrece un gran rendimiento en condiciones de viento menos que óptimas se vuelve muy significativo.  
40

Sin embargo, un sistema de control de paso avanzado debería hacer algo más que sólo regular la potencia y el momento de fuerza. Debería maximizar la producción anual de energía. Esto no puede conseguirse con las tecnologías actuales porque las tecnologías de control de paso actuales suponen que los valores de entrada de sensor son correctos. Como se indica en el presente documento, ésta no es una suposición válida.  
45

Un sistema de control de paso ideal conseguiría ángulos de paso óptimos para cualquier velocidad del viento para maximizar la producción anual de energía. Normalmente esto se intenta utilizando sensores para ángulos de paso y guiñada, un anemómetro para medir la velocidad del viento, y posiblemente una base de datos predefinida que  
50 identifica ángulos de paso óptimos en función de la velocidad del viento. Desafortunadamente, estos sistemas de detección incluyendo la base de datos predefinida están llenos de errores y, por tanto, no pueden ofrecer por sí mismos la producción anual máxima de energía para el sistema.

Además de las imprecisiones inherentes a los anemómetros debidas a errores de sesgo, errores de factor de escala, efectos de sombra impuestos por palas pasantes, y vórtices locales, también hay que tener en cuenta el hecho de que el punto en el que se mide la velocidad del viento no es una representación precisa de la velocidad real del viento para todas las secciones del elemento de pala. A lo largo del diámetro del rotor hay gradientes en la velocidad del viento, y donde se sitúe cada rotor dentro de ese gradiente determinará su potencia de salida disponible. La única suposición válida que se puede hacer con respecto a la medición actual de la velocidad del viento es que el  
60 valor es incorrecto.

Los sensores que miden los ángulos de paso tienen una serie similar de deficiencias. Además de los errores de sesgo y de factor de escala también hay errores inherentes al paso de pala real frente al paso de pala supuesto, debido a tolerancias mecánicas y al hecho de que la torsión en la pala puede cambiar en función de la velocidad del viento. De nuevo, la única suposición válida que puede hacerse es que las mediciones de paso son incorrectas.  
65

Además de los errores de sensor presentes el primer día de funcionamiento, es razonable esperar que estos errores cambien con el tiempo por un deterioro del sensor, deriva electrónica, y cambios de la temperatura y densidad del aire según la estación.

5 El sistema de control de paso automatizado dado a conocer supone que todas las entradas de sensor son incorrectas, corrige constantemente los sensores, y proporciona niveles de potencia máximos todo el año, año tras año. La figura 16 ilustra una gráfica comparativa de la curva de potencia para diversos diseños de turbina pequeños, comercialmente disponibles en el primer día de funcionamiento en relación con el diseño de 15 kW dado a conocer (WKT) con el sistema de control de paso automatizado. Como se indica, el diseño WKT alcanza la potencia nominal a una velocidad del viento inferior que los otros diseños, de modo que puede extraer más energía eólica en los regímenes de velocidad del viento inferiores. La figura 17 ilustra gráficamente la producción anual de energía (AEP) para cada una de las turbinas eólicas en la figura 16. Aunque el diseño WKT (Wind King) limite la potencia de salida a 15 kW, su producción anual de energía es mucho mayor, llevando a una mejor propuesta de valor.

15 Ejemplo 4: Magnitudes reducidas en las variaciones de empuje transitorias

Una turbina eólica ideal produciría un empuje constante a todas las velocidades del viento y condiciones de ráfaga por encima de su límite de potencia máximo. El sistema de control de paso automatizado dado a conocer reduce significativamente las variaciones de empuje en condiciones de viento transitorias, aunque en la actualidad no puede eliminarlas. Las figuras 18-20 ilustran gráficamente cargas de empuje sobre las palas de rotor en tres condiciones de viento transitorias diferentes. La reducción del ángulo de ataque a tiempo durante las condiciones de viento transitorias reduce la resistencia sobre los perfiles aerodinámicos al tiempo que se reducen los niveles de momento de fuerza y potencia de salida. Aunque los empujes sobre el monopolo y la góndola no están incluidos en las gráficas de empuje, la carga de empuje total tendría una menor variación si estuvieran incluidos porque el empuje sobre el monopolo y la góndola aumentaría mientras disminuye el empuje sobre los perfiles aerodinámicos. Las cargas de empuje reducidas pueden ofrecer el potencial para reducir los costes de torre, que son una de las partidas presupuestarias individuales más grandes en cuanto a coste para una turbina eólica. Esta reducción del empuje también puede ser de interés para sistemas basados en plataformas de aguas profundas en alta mar que son mucho menos tolerantes a las condiciones de viento transitorias.

El sistema de control de paso automatizado dado a conocer es simple desde el punto de vista electromecánico, ofrece reducciones significativas en el coste de fabricación total, y ofrece una regulación de potencia y control de paso sin precedentes permitiendo al mismo tiempo los siguientes beneficios: vida útil de transmisión más larga; vida útil de generador e inversor más larga; producción anual de energía significativamente mayor; magnitudes reducidas en las variaciones de empuje transitorias; palas significativamente más grandes con mayores diámetros de rotor de barrido; diseños a bajas rpm seguros para aves y murciélagos que no matan a las especies amenazadas; diseños mejorados a baja velocidad del viento para ubicaciones con recursos eólicos limitados; producción de potencia más uniforme para una mejor utilización de la red eléctrica; y una regulación significativamente mejorada de momento de fuerza y potencia de salida. Se espera que el sistema de control de paso automatizado dado a conocer ahorre a fabricantes y clientes entre 50.000 \$ y 100.000 \$ por megavatio por año. Aunque el sistema de control de paso automatizado dado a conocer estaba previsto principalmente para su uso con turbinas eólicas de velocidad fija, también puede utilizarse con turbinas eólicas de velocidad variable.

Aunque la presente invención se ha descrito con referencia a varias formas de realización específicas, se entenderá que el alcance de la invención se determinará sólo con respecto a las reivindicaciones respaldadas por la presente memoria descriptiva. Además, aunque en numerosos casos en el presente documento se describen sistemas y aparatos y procedimientos teniendo un determinado número de elementos se entenderá que tales sistemas, aparatos y procedimientos pueden ponerse en práctica con menos elementos que el determinado número mencionado. Además, aunque se han descrito una serie de formas de realización particulares, se entenderá que pueden utilizarse características y aspectos que se han descrito con referencia a cada forma de realización particular con cada forma de realización restante descrita particularmente.

**REIVINDICACIONES**

1. Una turbina eólica (10, 110), que comprende:
- 5 un subsistema de cubo (16, 26, 126) que comprende un cubo principal (30, 130) y un árbol (36, 136) adaptado para rotar sobre un eje (18);
- una pluralidad de palas de turbina (14, 114) que tienen un ángulo de paso ( $\alpha$ ) definido por un ángulo entre una cuerda de una pala de turbina y un vector que representa el viento en contra, estando adaptadas las palas (14, 114) para accionar la rotación del subsistema de cubo (16, 26, 126) a una primera velocidad;
- 10 un subsistema de accionamiento de paso (28, 128) que comprende un elemento de accionamiento (42, 142) adaptado para rotar sobre el eje (18) a una segunda velocidad, estando adaptado el elemento de accionamiento (42, 142) para controlar el ángulo de paso ( $\alpha$ ) de las palas de turbina (14, 114) en relación con una diferencia entre la primera velocidad y la segunda velocidad;
- 15 un generador con una función de deslizamiento (56, 156), en la que el generador con la función de deslizamiento (56, 156) es un generador con deslizamiento, un generador con deslizamiento mejorado (56), un generador de velocidad variable, un generador con un embrague, un generador con una transmisión, o una combinación de los mismos, permitiendo el generador con la función de deslizamiento (56, 156) que el subsistema de cubo (16, 26, 126) aumente la primera velocidad a medida que aumenta la potencia y disminuir la primera velocidad a medida que disminuye la potencia; y
- 20 un sistema de control activo (70) adaptado para controlar la segunda velocidad del elemento de accionamiento (42, 142), en la que
- un aumento en la primera velocidad en relación con la segunda velocidad da lugar a que disminuya el ángulo de paso ( $\alpha$ ), y/o
- 25 una disminución en la primera velocidad en relación con la segunda velocidad da lugar a que aumente el ángulo de paso ( $\alpha$ ).
2. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 1, en la que el elemento de accionamiento (42, 142) del subsistema de accionamiento de paso (28, 128) comprende un engranaje de accionamiento (42) configurado para rotar a la segunda velocidad, comprendiendo además la turbina eólica un engranaje accionado (46) acoplado al engranaje de accionamiento (42), estando configurado el engranaje accionado (46) para traducir la diferencia en las velocidades entre el subsistema de cubo (16, 26, 126) y el subsistema de accionamiento de paso (28, 128) en un cambio en el ángulo de paso ( $\alpha$ ) de las palas de turbina (14, 114).
- 35 3. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 2, en la que el engranaje accionado (46) comprende una pluralidad de engranajes.
4. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 2, en la que el engranaje de accionamiento (42) y el engranaje accionado (46) son engranajes cónicos.
- 45 5. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 1, en la que el elemento de accionamiento (42, 142) del subsistema de accionamiento de paso (28, 128) comprende un árbol (42, 142) configurado para rotar a la segunda velocidad, comprendiendo además la turbina eólica una conexión mecánica (162) acoplada al árbol (42, 142), estando configurada la conexión mecánica (162) para traducir la diferencia en las velocidades entre el subsistema de cubo (16, 26, 126) y el subsistema de accionamiento de paso (28, 128) en un cambio en el ángulo de paso ( $\alpha$ ) de las palas de turbina (14, 114).
- 50 6. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 5, en la que la conexión mecánica (162) comprende radios (160) y varillas (164).
- 55 7. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 1, en la que el elemento de accionamiento (42, 142) del subsistema de accionamiento de paso (28, 128) comprende una correa de transmisión, polea, o un sistema de dispositivos hidráulicos o electromecánicos.
- 60 8. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 1, en la que el generador con deslizamiento mejorado (56) comprende un generador de inducción de jaula de ardilla.
9. La turbina eólica (10, 110) según la reivindicación 1, en la que la función de deslizamiento (58) se proporciona mediante un generador, un sistema de control de generador, y/o una transmisión eléctrica, magnética, mecánica o hidráulica con o sin embrague (56, 156).
- 65

10. Un procedimiento para controlar un ángulo de paso de pala de turbina eólica ( $\alpha$ ), que comprende:
- 5 proporcionar un subsistema de cubo (16, 26, 126) que comprende un cubo principal (30, 130) y un árbol (36, 136);
- proporcionar una pluralidad de palas de turbina (14, 114) que tienen un ángulo de paso ( $\alpha$ ) definido por un ángulo entre una cuerda de una pala de turbina y un vector que representa el viento en contra;
- 10 accionar, mediante las palas de turbina (14, 114), la rotación del subsistema de cubo (16, 26, 126) sobre un eje (18) a una primera velocidad;
- proporcionar un subsistema de accionamiento de paso (28, 128) que comprende un elemento de accionamiento (42,142) adaptado para rotar sobre el eje (18) independientemente del subsistema de cubo (16, 26, 126); controlar, mediante un sistema de control activo (70), el elemento de accionamiento (42,142) para rotar a una segunda velocidad; y
- 15 controlar el ángulo de paso ( $\alpha$ ) de las palas de turbina mediante el elemento de accionamiento (42,142) cuando la primera velocidad es diferente de la segunda velocidad, en el que
- 20 un aumento en la primera velocidad en relación con la segunda velocidad da lugar a que el elemento de accionamiento (42,142) disminuya el ángulo de paso ( $\alpha$ ), y/o
- una disminución en la primera velocidad en relación con la segunda velocidad da lugar a que el elemento de accionamiento (42,142) aumente el ángulo de paso ( $\alpha$ ).
- 25 11. El procedimiento según la reivindicación 10, que comprende:
- proporcionar un generador con una función de deslizamiento (56, 156), en el que el generador con la función de deslizamiento (56, 156) es un generador con deslizamiento, un generador con deslizamiento mejorado (56), un generador de velocidad variable, un generador con un embrague, un generador con una transmisión, o una combinación de los mismos, en el que, opcionalmente, el embrague o la transmisión es eléctrico, magnético, mecánico o hidráulico; y
- 30 acoplar el generador con la función de deslizamiento (56, 156) al subsistema de cubo (26, 126) y al subsistema de accionamiento de paso (28, 128),
- 35 permitiendo el generador con la función de deslizamiento (56, 156) que el subsistema de cubo (16, 26, 126) aumente la velocidad a medida que aumenta la potencia y que disminuya la velocidad a medida que disminuye la potencia.
- 40 12. El procedimiento según la reivindicación 10 u 11, que comprende además controlar el elemento de accionamiento (42,142) con un sistema de control activo adaptativo (68).
13. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, en el que el elemento de accionamiento (42,142) del subsistema de accionamiento de paso (28, 128) comprende una correa de transmisión, polea, o un sistema de dispositivos hidráulicos o electromecánicos.
- 45 14. El procedimiento según la reivindicación 12, en el que el sistema de control activo adaptativo (68) supone que todos los valores de sensor medidos son incorrectos, y en el que controlar el elemento de accionamiento comprende compensar los valores de sensor medidos incorrectos.
- 50 15. El procedimiento según la reivindicación 14, en el que compensar comprende almacenar una función de paso (74) en una base de datos, correlacionando la función de paso los valores de ángulo de paso medidos con los valores de potencia de salida medidos (76).

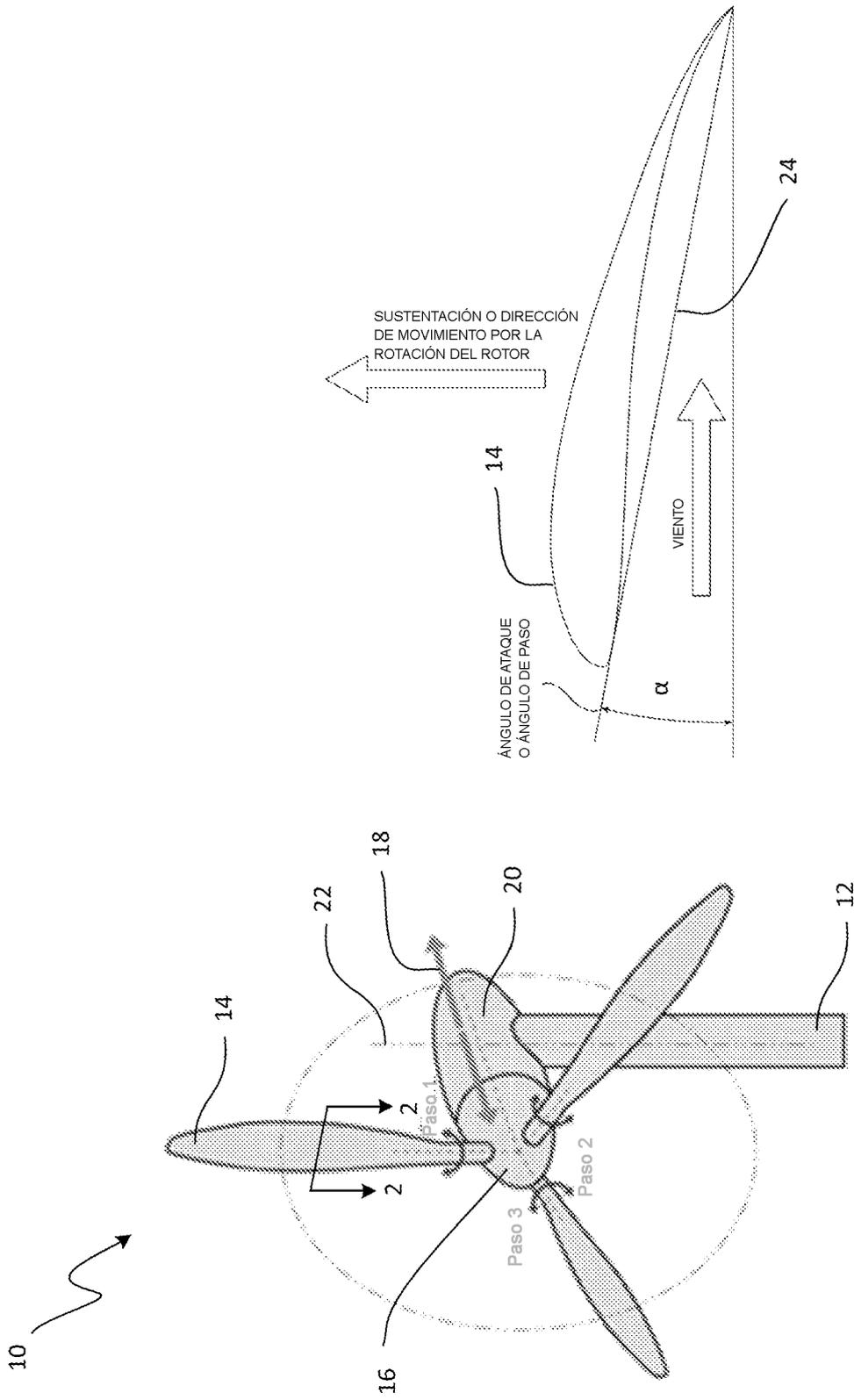


FIG. 1

FIG. 2

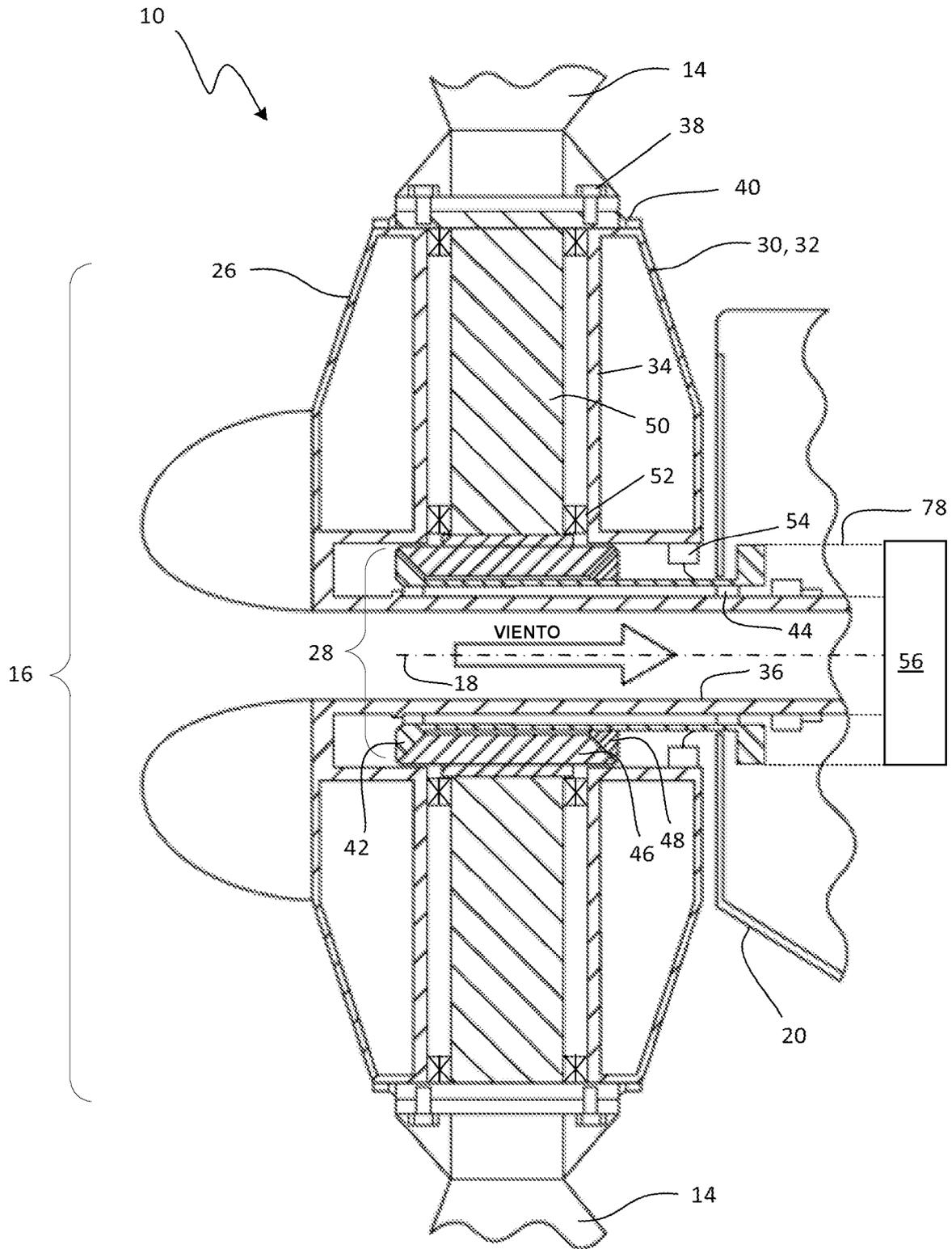


FIG. 3

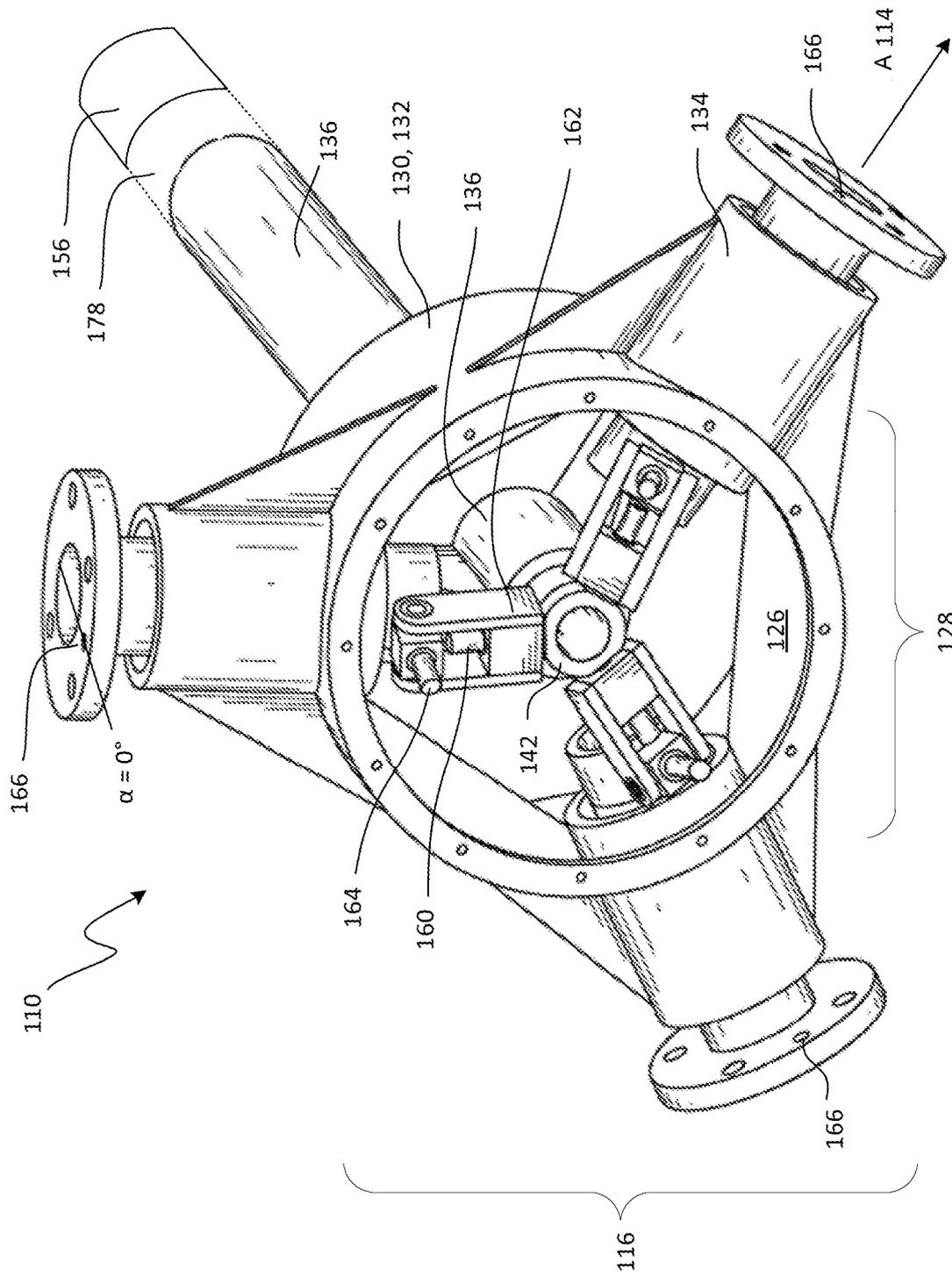


FIG. 4

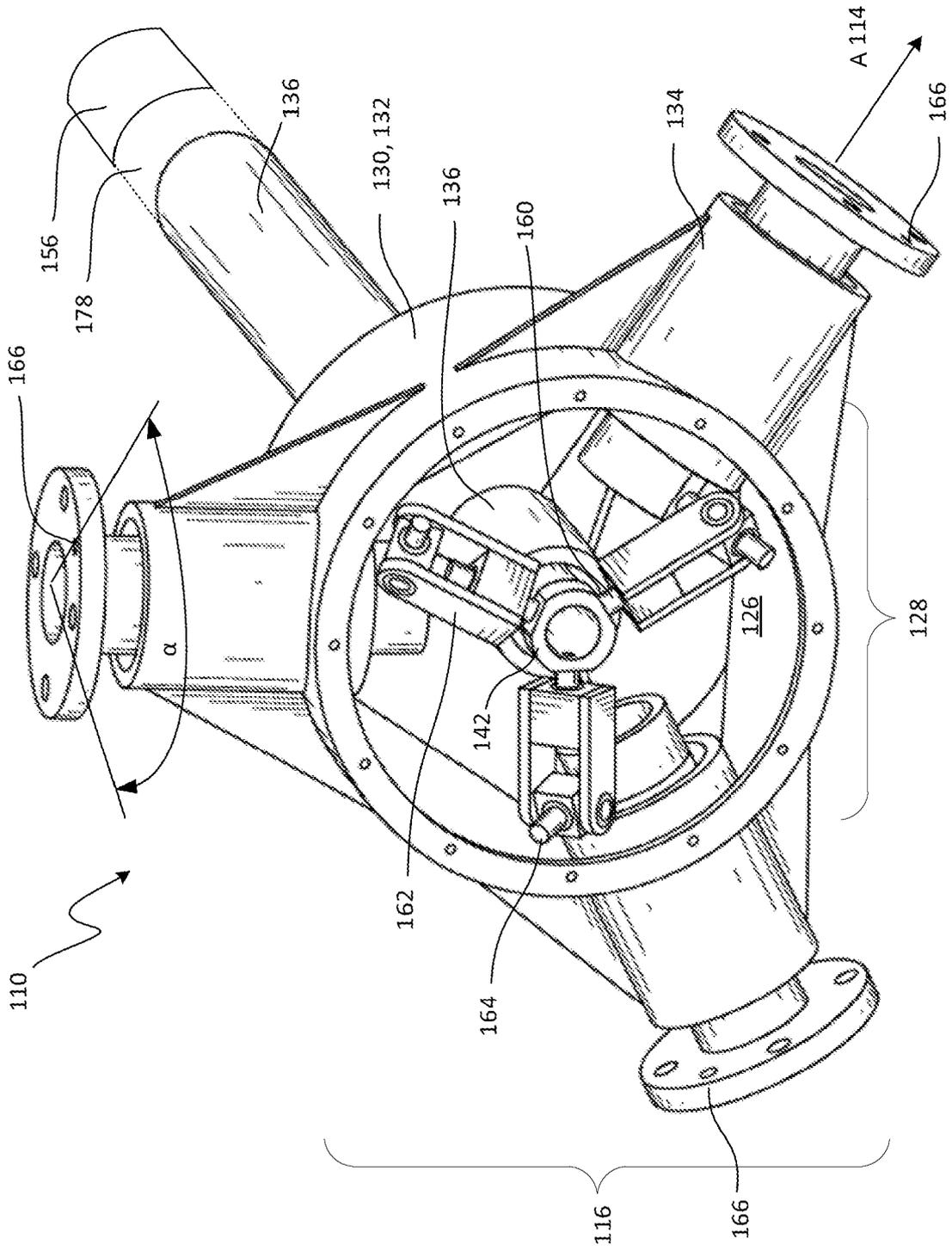


FIG. 5

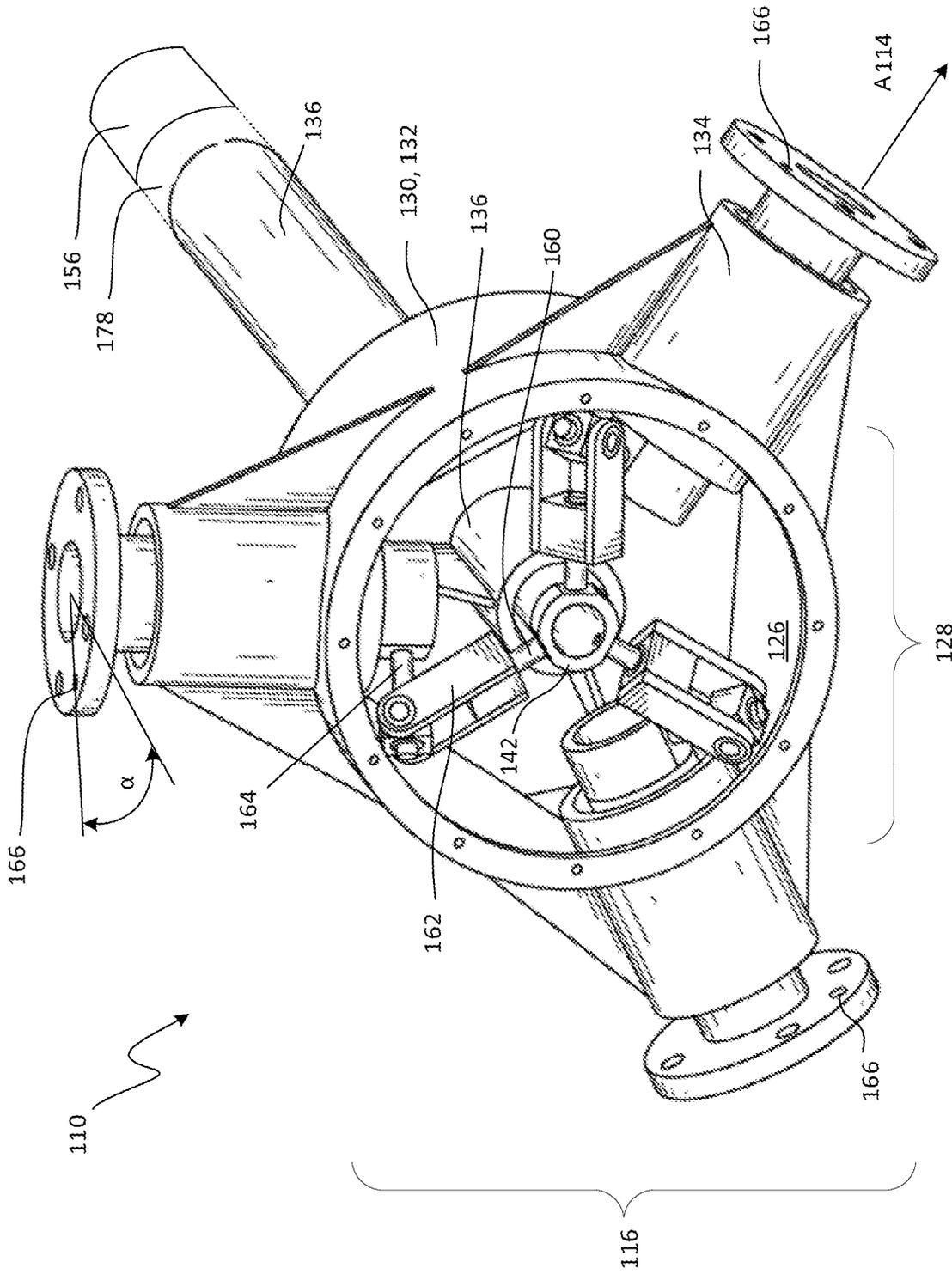


FIG. 6

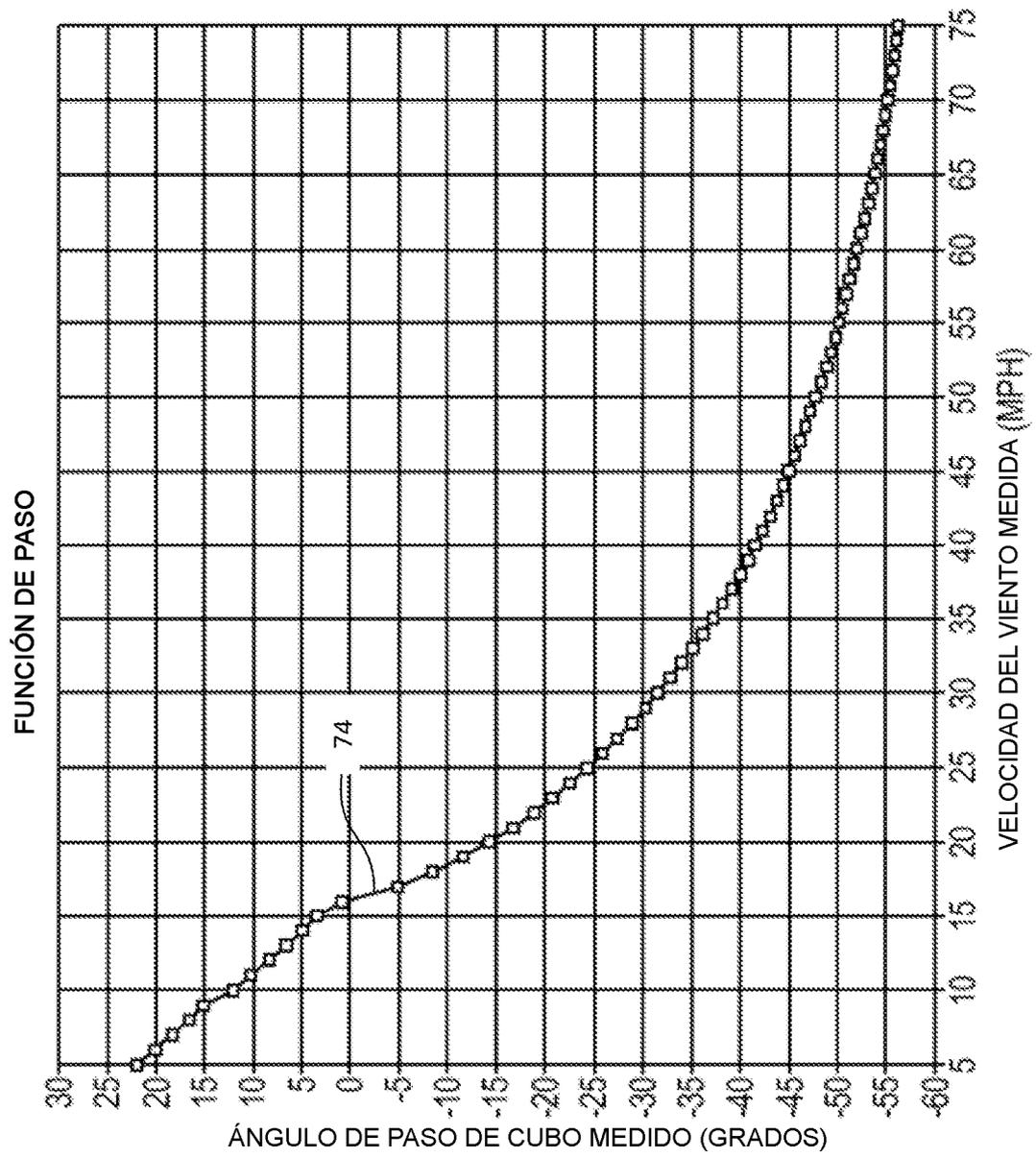


FIG. 7

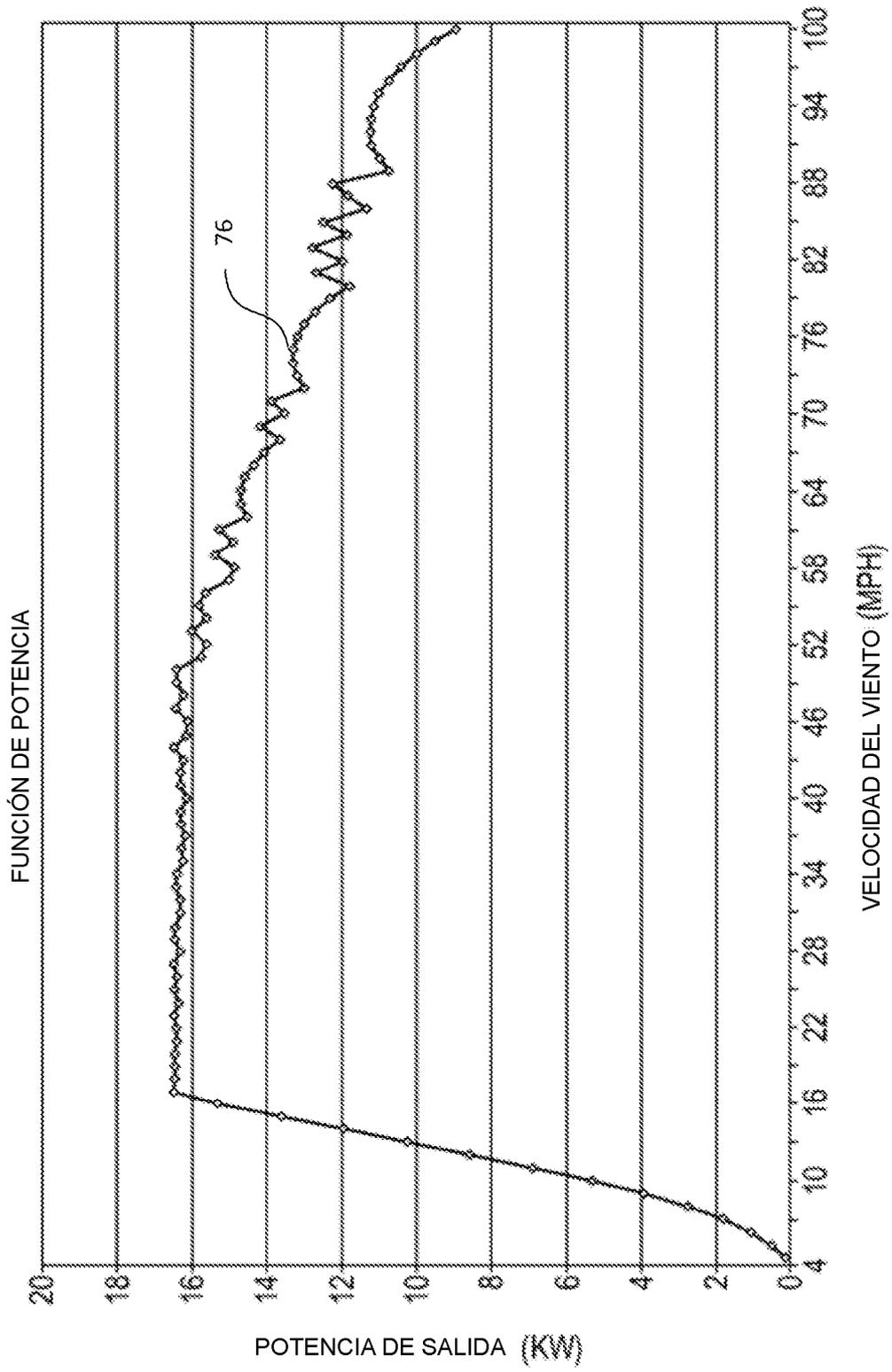


FIG. 8

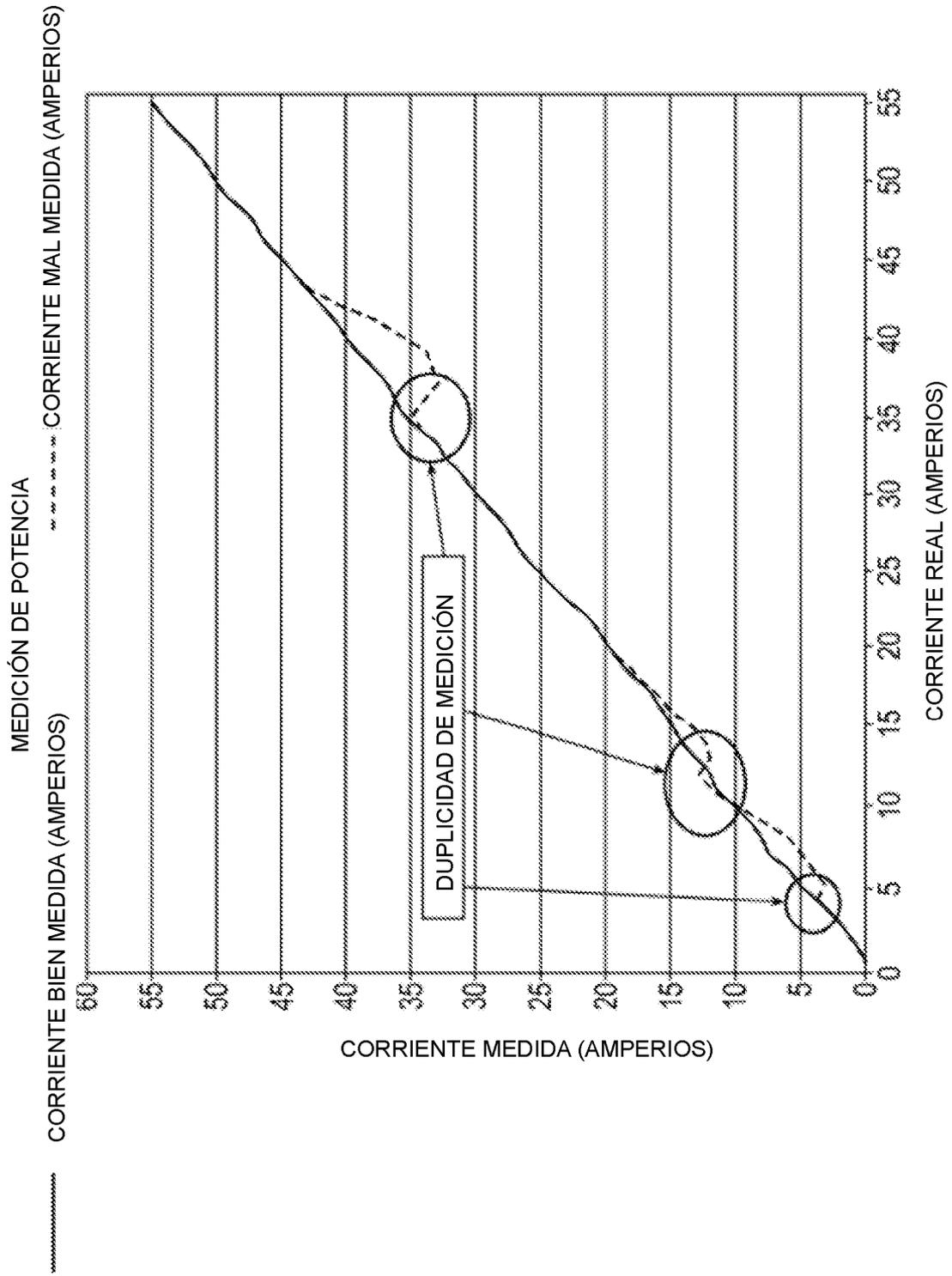


FIG. 9

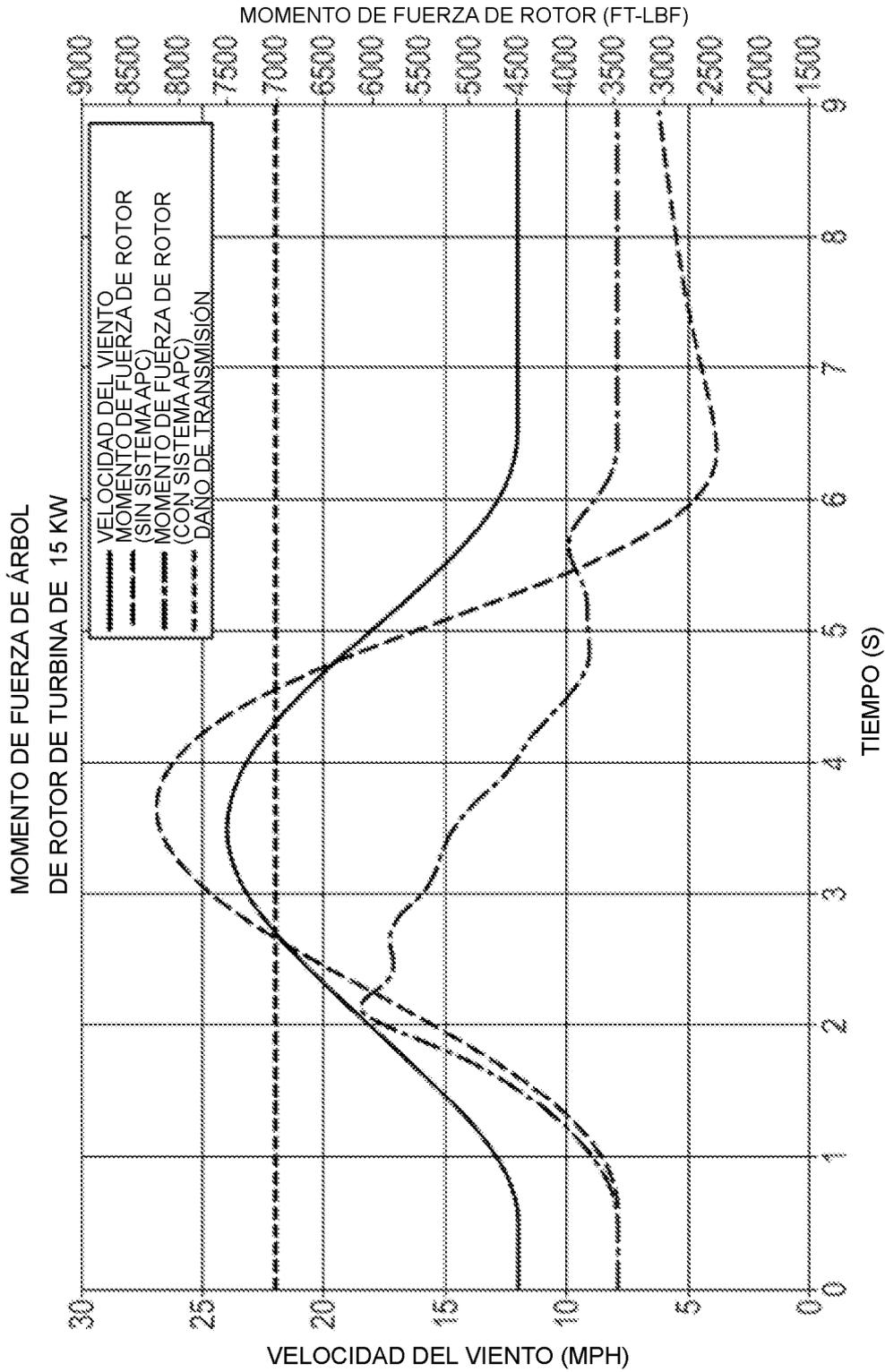


FIG. 10

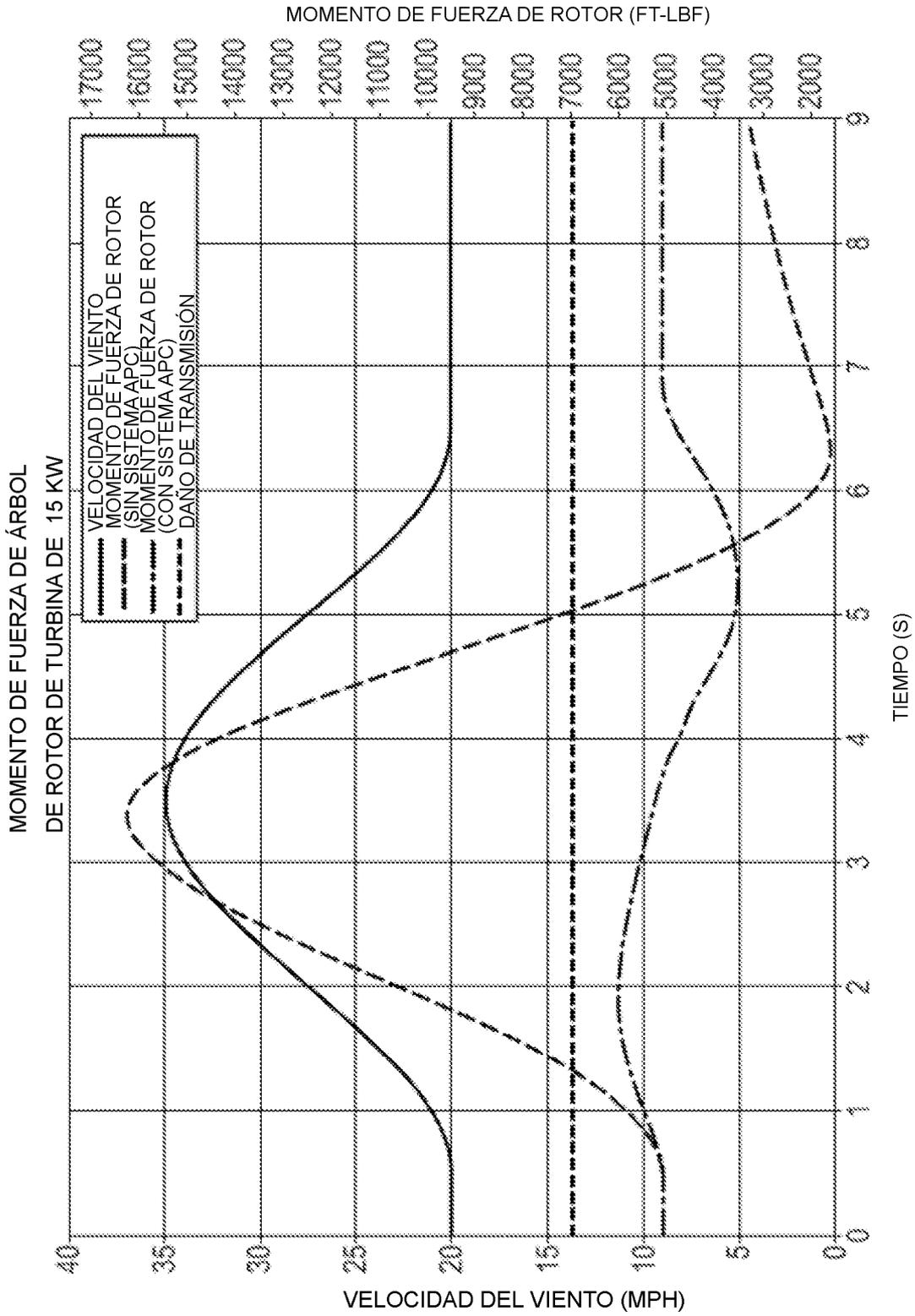


FIG. 11

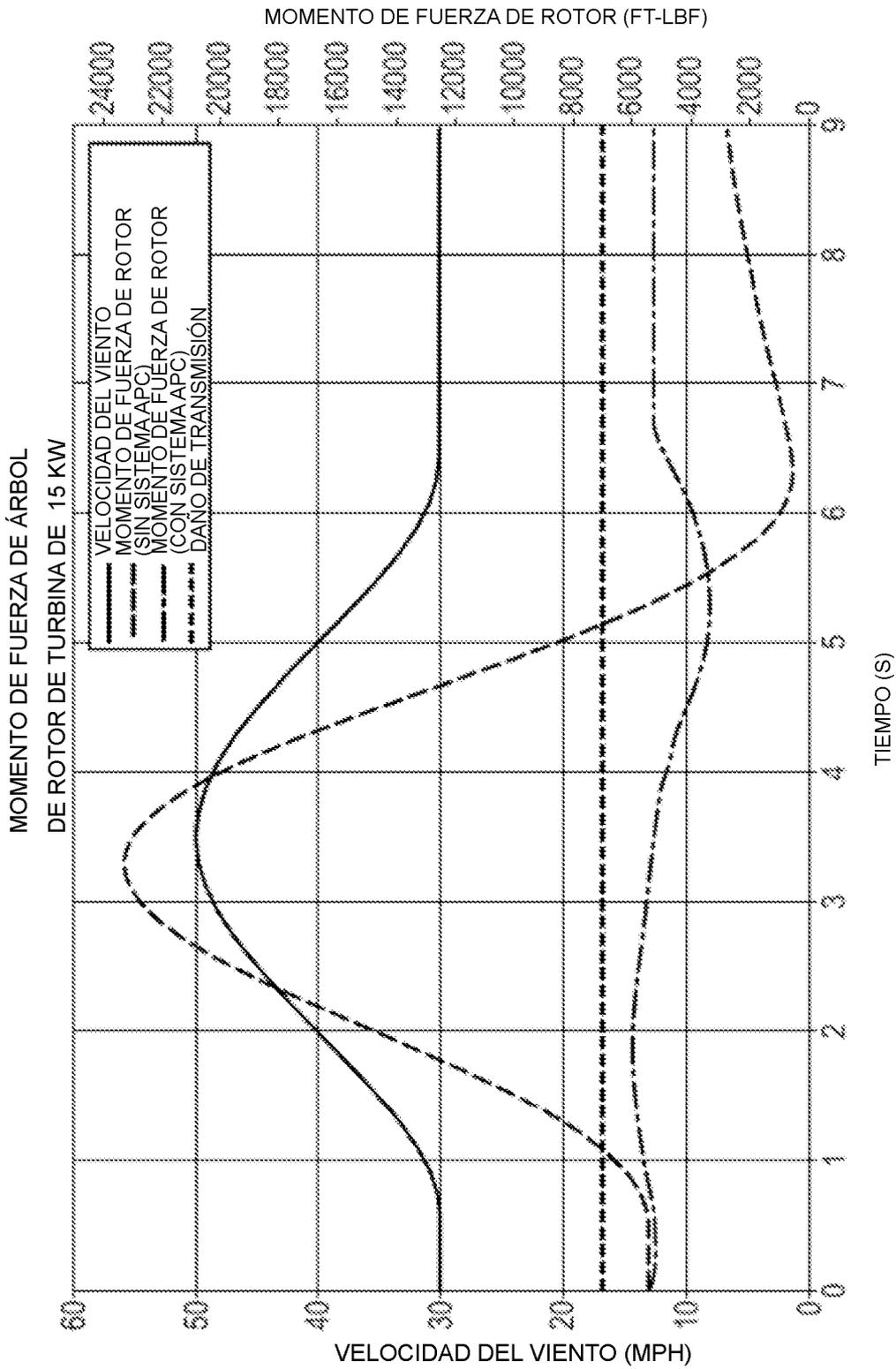


FIG. 12

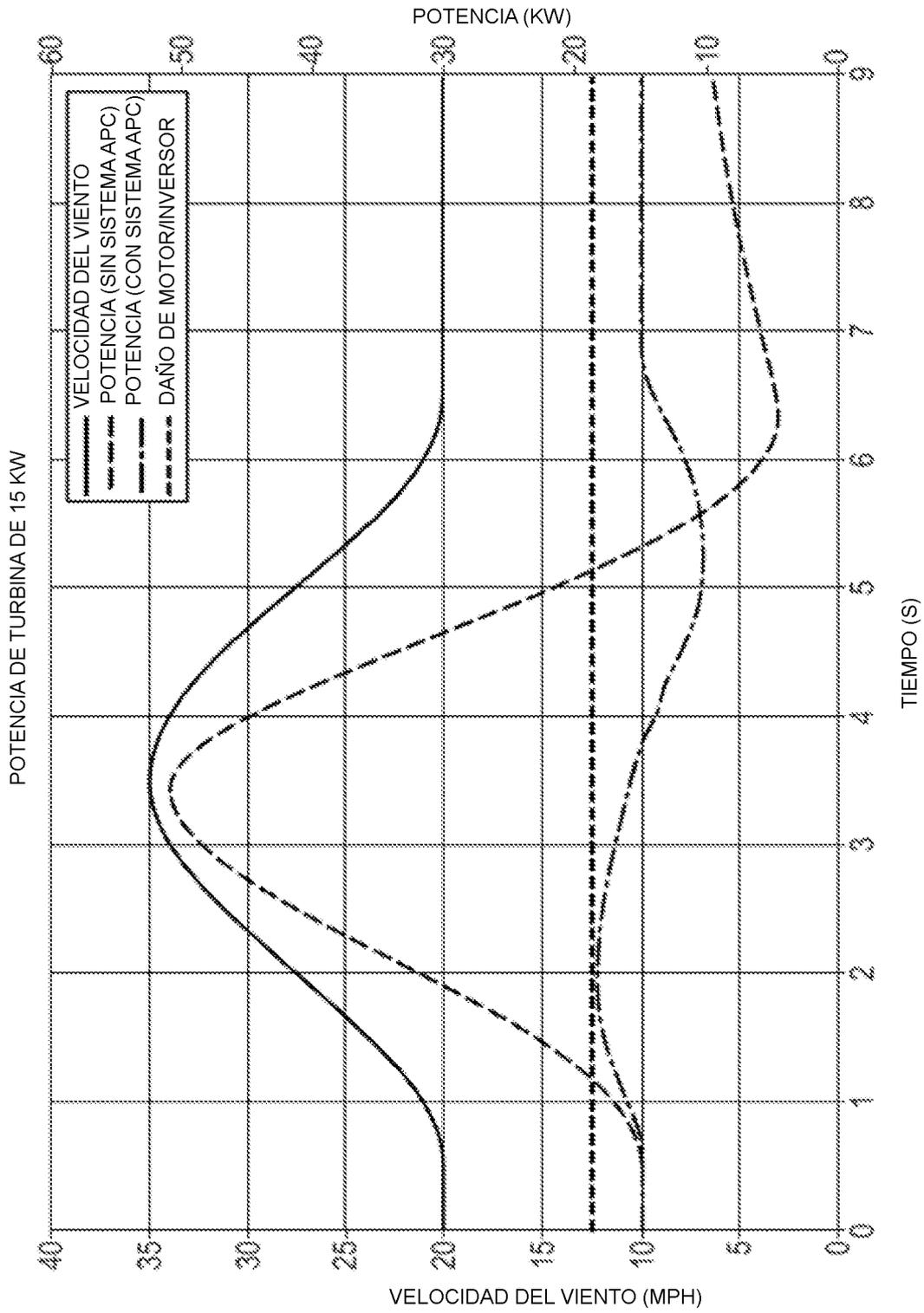


FIG. 13

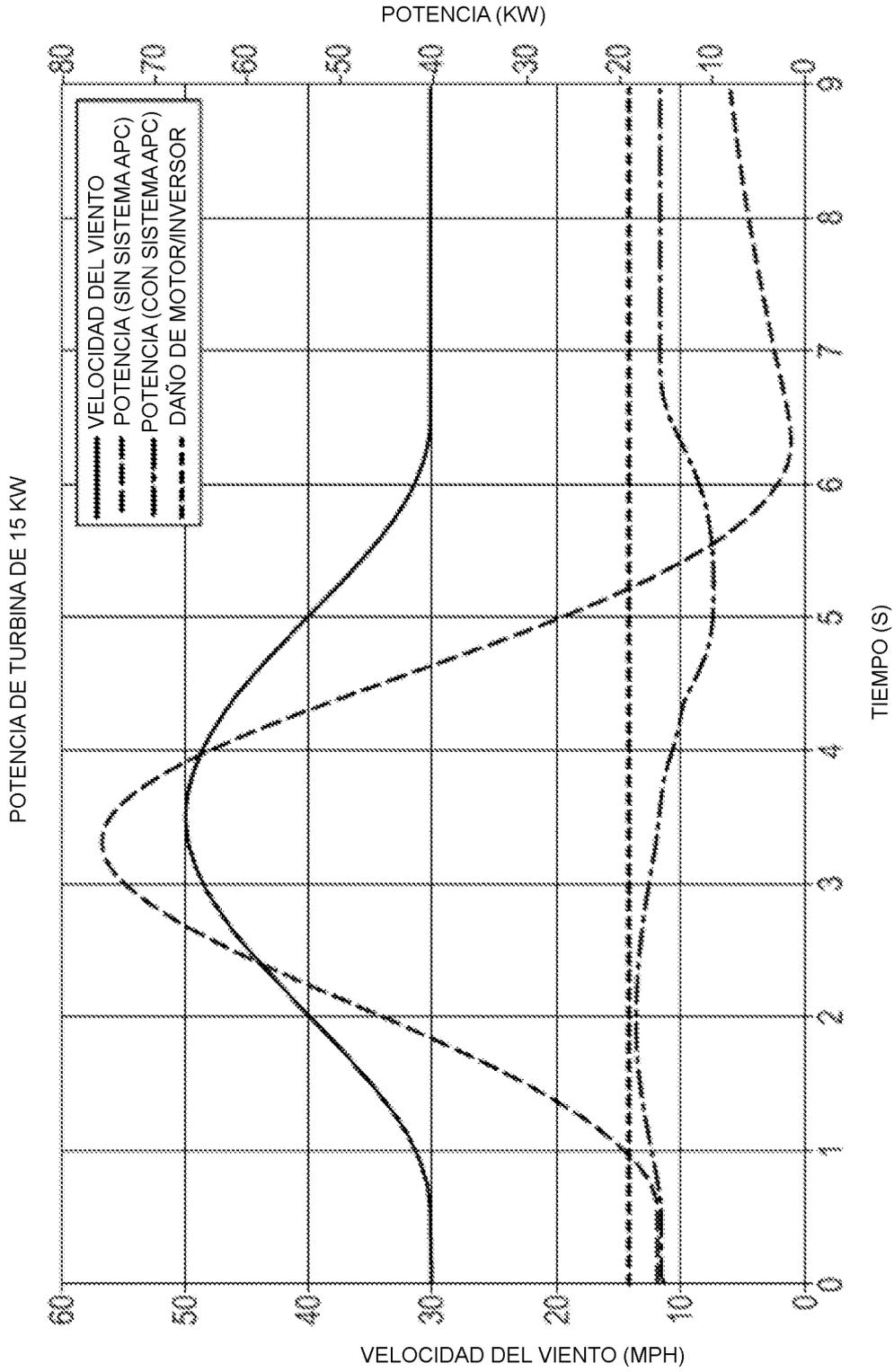


FIG. 14

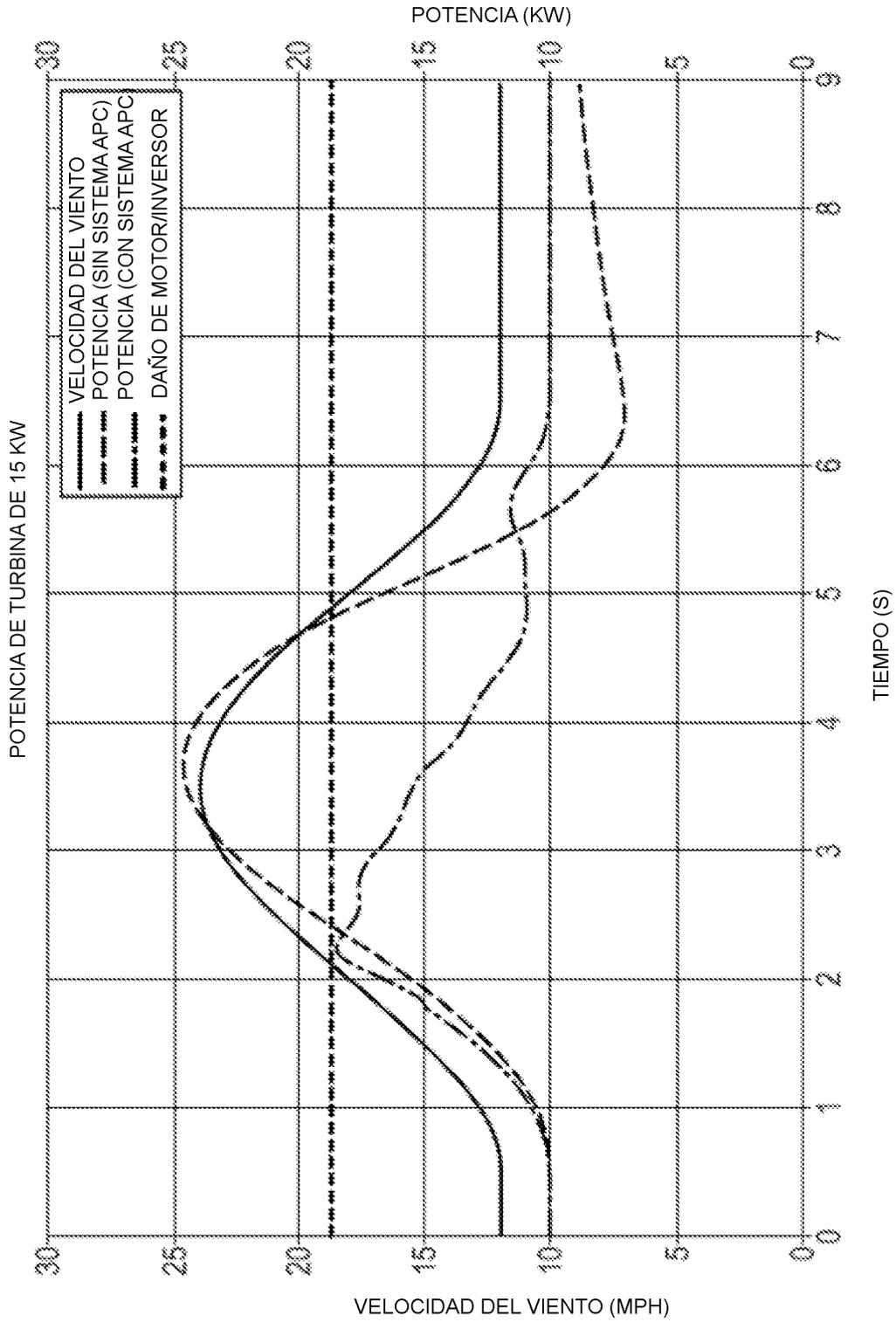


FIG. 15

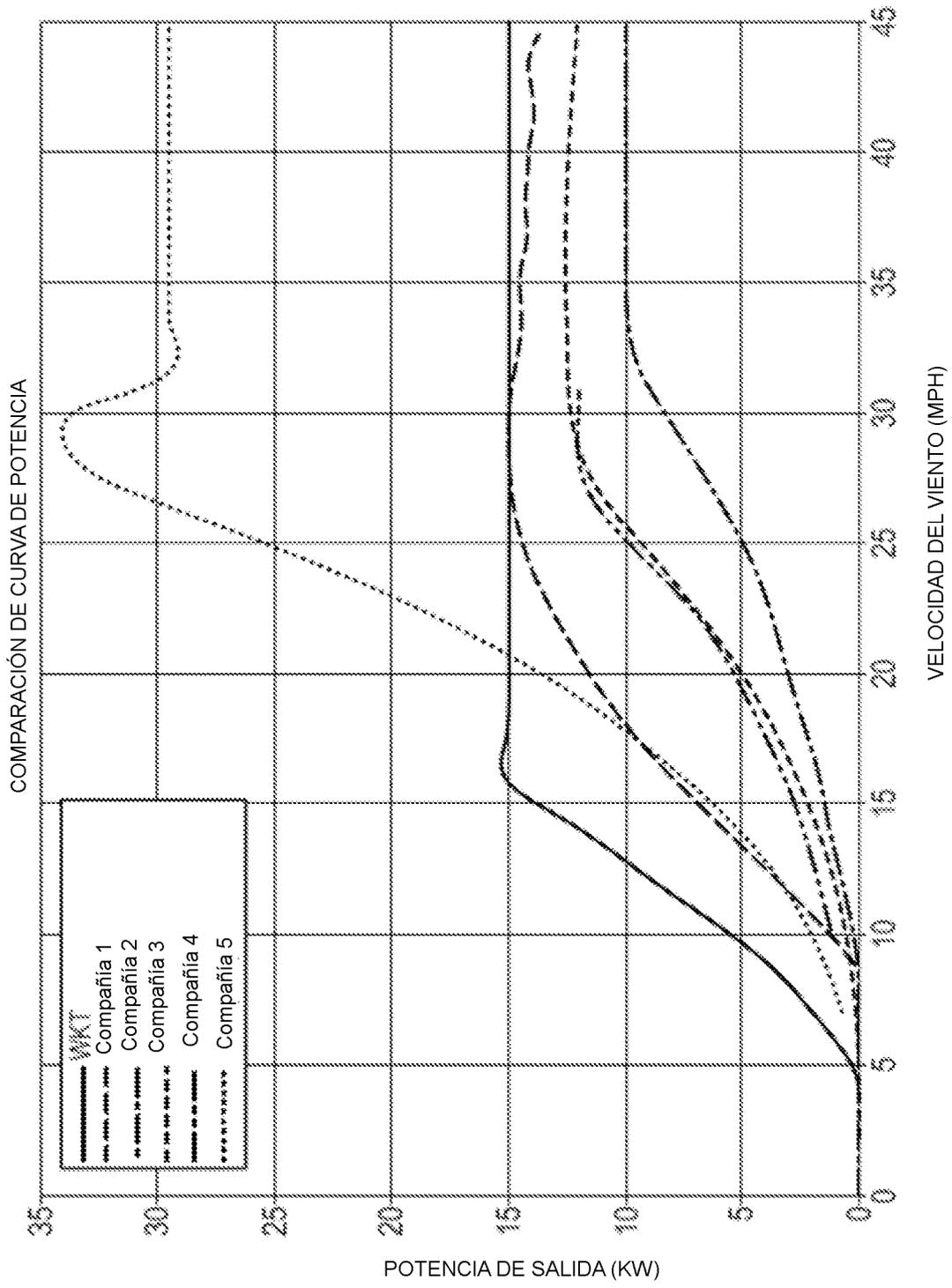


FIG. 16

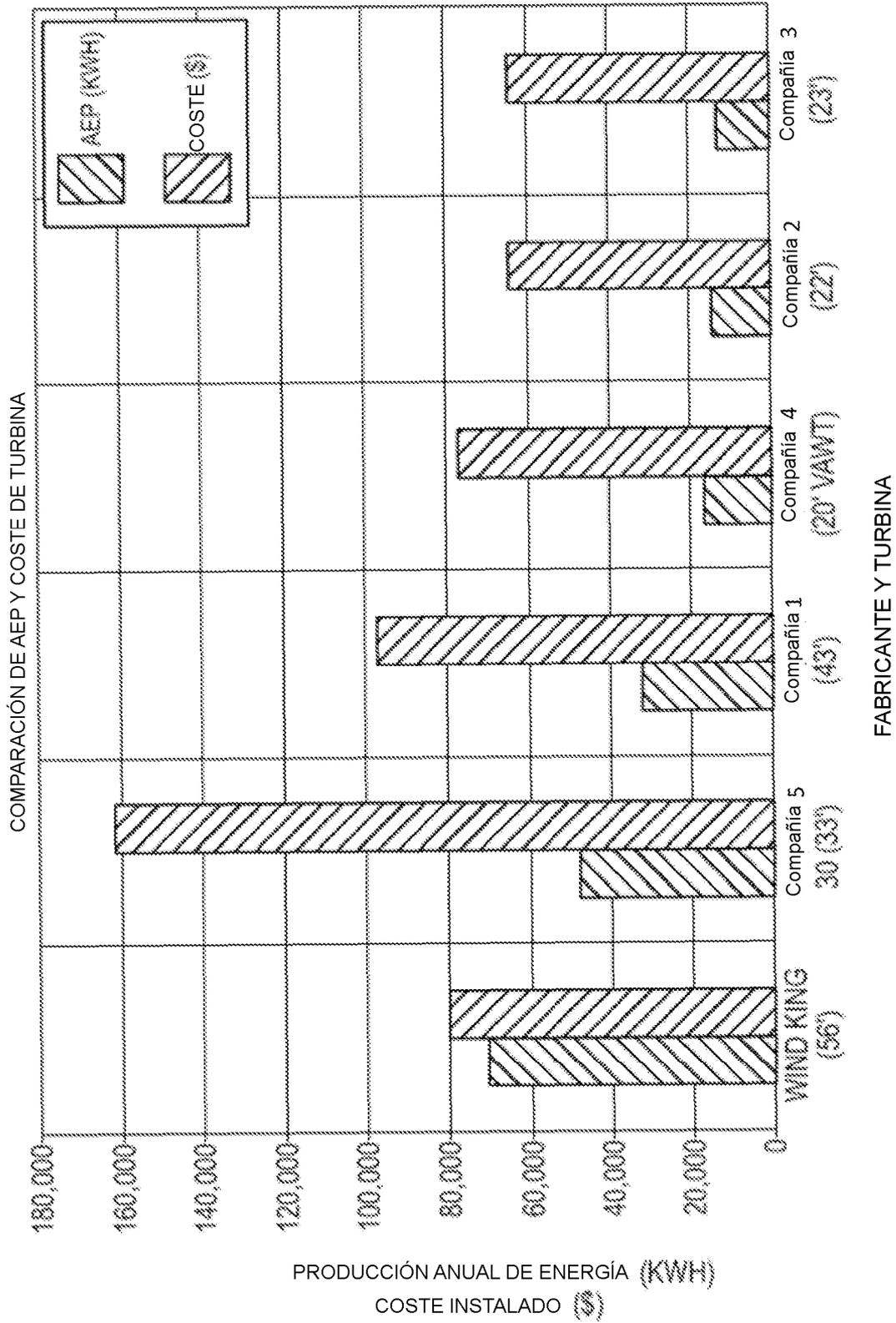


FIG. 17

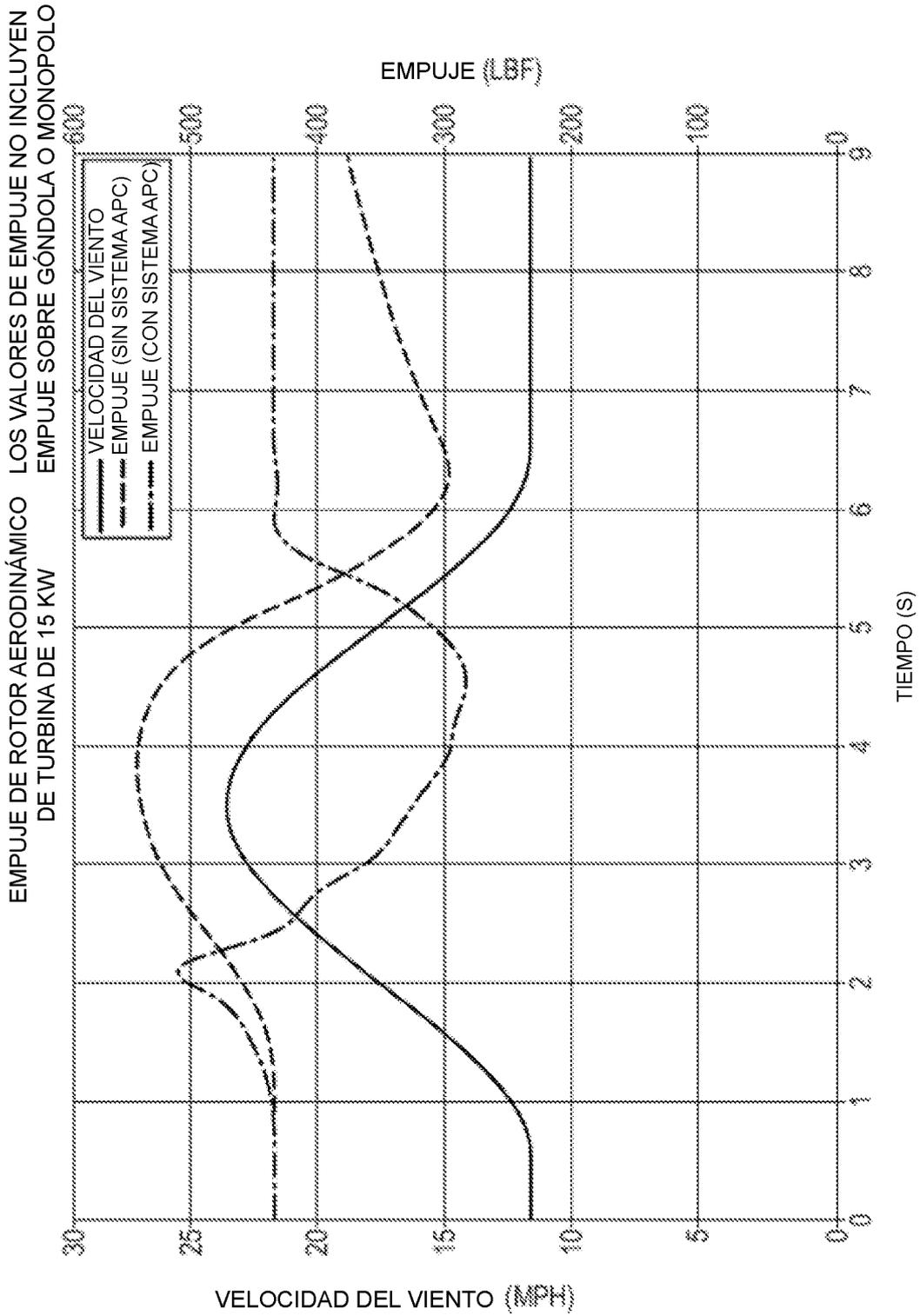


FIG. 18

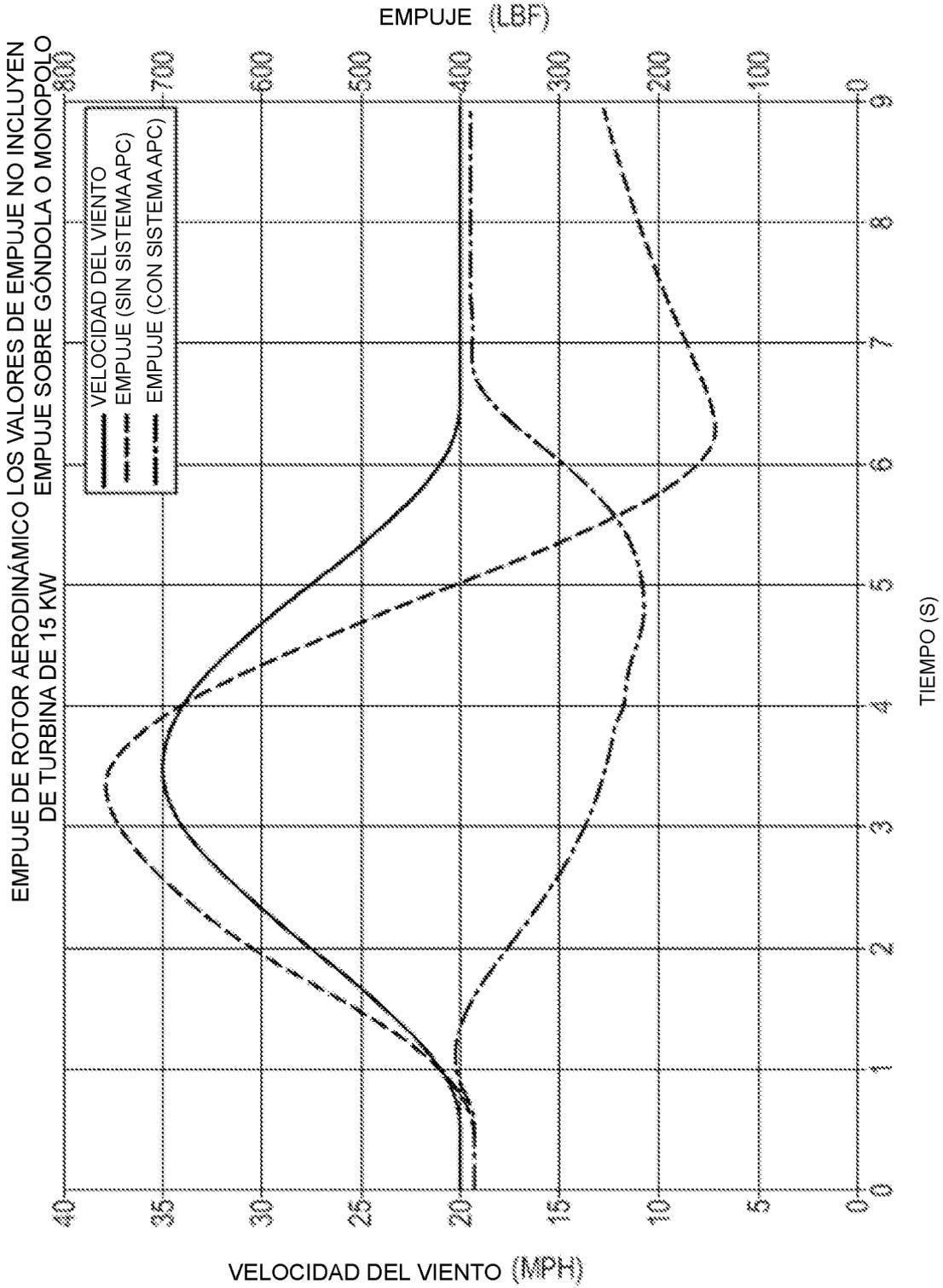


FIG. 19

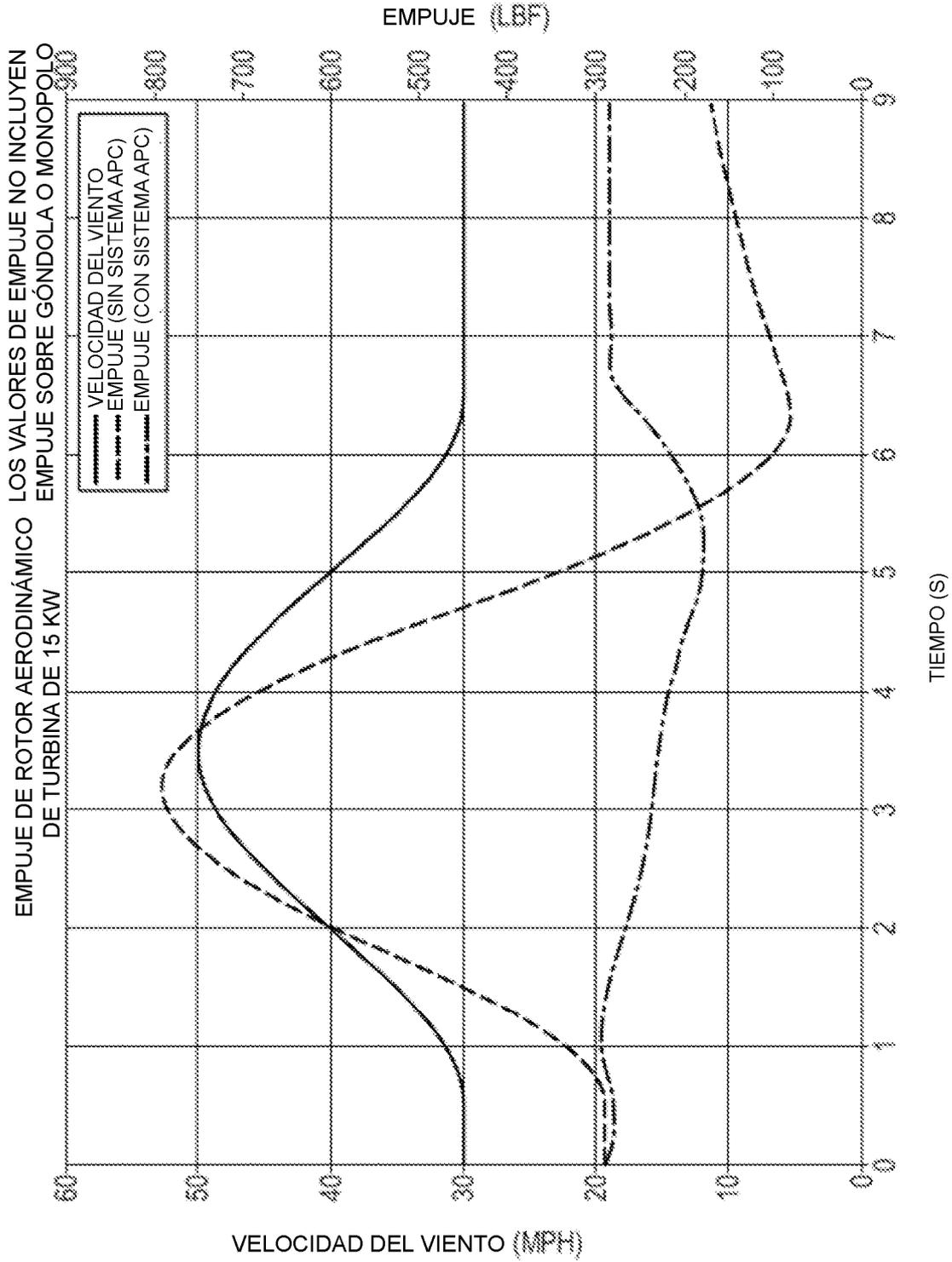


FIG. 20

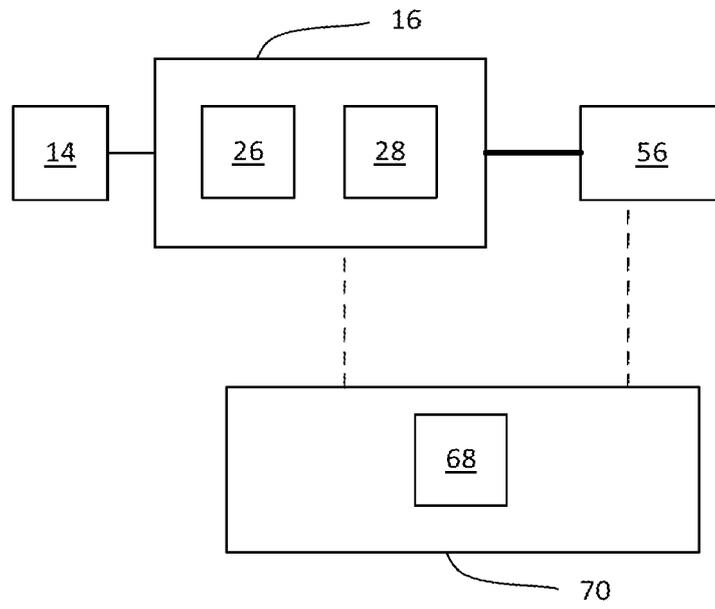


FIG. 21