



①9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

①1 Número de publicación: **2 282 406**

⑤1 Int. Cl.:
F03D 1/00 (2006.01)
F03D 9/00 (2006.01)

①2

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑧6 Número de solicitud europea: **02718736 .8**
⑧6 Fecha de presentación : **28.03.2002**
⑧7 Número de publicación de la solicitud: **1373719**
⑧7 Fecha de publicación de la solicitud: **02.01.2004**

⑤4 Título: **Sistema para una turbina con un medio de trabajo líquido o gaseoso.**

③0 Prioridad: **30.03.2001 SE 0101150**

④5 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.10.2007

④5 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.10.2007

⑦3 Titular/es: **Deltawind AB.**
Box 2879
187 28 Täby, SE

⑦2 Inventor/es: **Engström, Staffan**

⑦4 Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

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 para una turbina con un medio de trabajo líquido o gaseoso.

5 Campo del invento

Este invento se refiere a un sistema para una turbina con un medio de trabajo gaseoso o líquido, en particular a una turbina eólica para un aerogenerador. La turbina comprende un eje, el cual es giratorio con una cierta frecuencia angular, un buje, al cual va unida al menos una pala de turbina, y un miembro de articulación, dispuesto entre el eje y el buje. El miembro de articulación comprende un cojinete y elementos de resorte, que ofrecen juntos una rigidez contra los movimientos del miembro de articulación. La pala de turbina tiene un factor de inercia másica en relación con el miembro de articulación, y está adaptada para moverse a través del flujo gaseoso o líquido, el cual tiene una dirección del flujo esencialmente perpendicular al plano de rotación de dicha pala de turbina y tiene una v_x variable en dicha dirección, de tal modo que el sistema queda expuesto a fuerzas de perturbación. El invento se refiere también a un aerogenerador con tal sistema.

Antecedentes del invento

Usualmente, los aerogeneradores tienen bujes rígidos, lo que significa que las palas de la turbina eólica tienen una conexión rígida con el buje. La función es aceptable cuando el número de palas es de al menos tres, ya que tres palas dispuestas simétricamente, en cierta medida, son capaces de nivelar las fuerzas de desequilibrio que se crean debido a las irregularidades en el campo del viento. Una reducción del número de palas a dos es deseable, ya que ello entraña una considerable reducción del coste de las palas, así como otras ventajas, tales como la de obtener un conjunto menos complicado. La producción anual de energía de la turbina de dos palas, calculada para una turbina de un cierto diámetro, se reduce solamente en un 2-3%. Sin embargo, una turbina eólica de buje rígido, de dos palas, está expuesta a considerables fuerzas de desequilibrio, incluso durante el funcionamiento normal, que producen fatiga en los componentes de la turbina. Esto debe ser compensado por un aumento de las dimensiones de todos los componentes principales, tales como esa solución de dos palas, de tal modo que esa solución de dos palas, debido a su excesivo coste, no está ya justificada. Como consecuencia, este tipo de turbina eólica no se fabrica ya.

El buje oscilante pasó a ser la solución de los problemas de la turbina eólica de buje rígido de dos palas. Se caracteriza porque las dos palas están fijadas rígidamente a un buje, el cual está articulado al eje de la turbina. En la Patente de EE.UU. N° 4.565.929 se describe un ejemplo de una turbina, que es capaz de oscilar $\pm 7^\circ$ hasta hacer contacto con los toques de la oscilación. La función es satisfactoria en las condiciones normales, lo que significa que el comportamiento frente a la fatiga es ventajoso. Sin embargo, en condiciones extremas del viento, con una alta turbulencia y altos gradientes transversales de la velocidad del viento, tales contactos con los toques de la oscilación pueden tener lugar de tal modo que den por resultado momentos más severos que los que se producen en una turbina eólica de buje rígido. Por consiguiente, son los casos de carga extrema los que son críticos. Ninguna de las turbinas con este simple tipo de buje oscilante ha llegado a ser de uso generalizado.

Con objeto de resolver los problemas originados por las cargas extremas, se ha propuesto controlar el movimiento oscilante, combinando para ello los toques de la oscilación con la amortiguación. Un ejemplo se ha descrito en la Patente de EE.UU. N° 5.354.175, en la cual se propone limitar el movimiento oscilante mediante una amortiguación hidráulica controlable. Ninguno de estos tipos de buje ha sido usado generalizadamente, lo que se debe a una falta de conocimiento de cómo deberá diseñarse un buje con objeto de evitar un serio aumento de las fuerzas de perturbación en el sistema, bajo ciertas condiciones.

50 Idea básica del invento

El objeto del presente invento es proporcionar un sistema para una turbina, en particular un sistema para una turbina eólica para un aerogenerador, que reduzca al mínimo los efectos de las fuerzas de desequilibrio originadas por las irregularidades en el campo del viento, y por lo tanto el riesgo de fatiga, y de cargas extremas en la estructura.

El invento está basado en admitir que una turbina eólica, por ejemplo, una turbina eólica de dos palas, con una articulación oscilante que tenga una cierta rigidez, en teoría puede considerarse como un sistema de masa elástica, de acuerdo con la mecánica clásica.

El campo del viento comprende tanto una variación sistemática, un gradiente de la velocidad transversal del viento, lo cual significa que la v_x media del viento es más alta durante la parte superior de la revolución de la turbina, como una variación estocástica, la turbulencia. Es evidente que el gradiente de la velocidad transversal del viento crea un ciclo de carga por cada revolución de la turbina en un sistema de coordenadas de co-rotación, con la turbina. También la menos significativa sombra de la torre (la corriente de aire que es perturbada por la torre, crea la misma variación. Como otra consideración, debe constatar que también la turbulencia creará componentes de la misma frecuencia, ya que las palas de turbina se mueven rápidamente (a 50-100 m/s, en comparación con la v_x del viento de aproximadamente 5-25 m/s) y sus irregularidades. Cada pala de turbina alcanzará por lo tanto una irregularidad específica del viento

varias veces, lo que significa que la perturbación resultante también en este caso tendrá una frecuencia que es igual a la frecuencia angular de rotación $\omega_{\text{rotación}}$ es decir:

$$\omega_{\text{perturbación}} = \omega_{\text{rotación}} \quad (1)$$

en lo que sigue, a esta Figura se la denomina como la *frecuencia de la perturbación*.

Es de hacer notar que esta condición es válida en un sistema de coordenadas de co-rotación, con la turbina, lo cual es relevante para aquellas fuerzas que afecten a la turbina. En un sistema de coordenadas que esté fijado a la góndola o torre, la frecuencia de la perturbación es proporcional al resultado de la multiplicación del número de palas por la frecuencia de rotación.

La mayor parte de las turbinas eólicas actuales operan a una v_x de rotación (frecuencia angular) que normalmente varía en un pequeño tanto por ciento, que depende del resbalamiento del generador inductor usado generalmente. Este valor puede aumentar hasta aproximadamente el diez por ciento, con un diseño de generador especial. En vez de funcionar a una v_x fija, la turbina eólica opera dentro de un margen de v_x es de rotación. Hay también generadores con dobles arrollamientos que operan dentro de dos márgenes de v_x es de rotación diferentes. Es posible controlar la v_x de rotación a cualquier valor, usualmente a uno bajo para bajas v_x es el viento, y a uno alto para altas v_x es del viento, aplicando para ello equipo eléctrico específico. La frecuencia angular de la rotación de la turbina $\omega_{\text{rotación}}$ deberá entenderse en el presente invento como el margen más alto de v_x de rotación que se usa durante el funcionamiento normal, conectado al circuito principal. Esto es posible dado que las altas v_x es de rotación se usan normalmente cuando las v_x es del viento son bastante altas, o altas, y la turbina eólica desarrolla una alta potencia de salida, lo que constituye las condiciones de funcionamiento que son decisivas para el dimensionado de la turbina.

Se puede calcular el factor de inercia másica de la turbina J_{turbina} , con relación al eje oscilante. La contribución del buje, sin embargo, es insignificante. Por consiguiente, el factor de inercia másica de la turbina puede ser aproximadamente el factor de inercia másica de las palas. Se supone que el miembro de articulación sea del tipo en el cual el movimiento es contrarrestado por resortes, lo que hace que sea posible calcular una constante elástica k para el miembro de articulación. La constante elástica constituye un valor de la rigidez del miembro de articulación. De acuerdo con la mecánica clásica, la frecuencia propia $\omega_{\text{resonancia}}$ de la turbina, con relación a la articulación, puede calcularse como

$$\omega_{\text{resonancia}} = \sqrt{k/J_{\text{turbina}}} \quad (2)$$

A partir de ahora, denominaremos a esta la *frecuencia propia de la articulación oscilante*. Es de hacer notar que, para mayor claridad, no se ha analizado aquí el impacto en la estabilización de los movimientos oscilantes de la fuerza centrífuga, es decir, el aumento de rigidez debido a la fuerza centrífuga.

Con objeto de explicar claramente la reacción general de tal sistema de masa elástica en las perturbaciones de frecuencias variables, se ha estudiado la amplificación, es decir la relación de la amplitud del sistema a la amplitud de la perturbación. Se ha añadido al sistema una amortiguación moderada, en correspondencia con un estado actual en el cual el aire amortiguará el movimiento de oscilación de las palas y el miembro de articulación puede ser dotado de elementos de amortiguación.

El estudio revela que una baja frecuencia de la perturbación, con relación a la frecuencia propia de la articulación oscilante, es decir, que el funcionamiento sea subcrítico de acuerdo con la mecánica clásica, produce una respuesta del sistema que es ligeramente mayor que la perturbación, es decir, que la amplificación excede justamente de 1, lo que corresponde a un buje ideal con un grado de rigidez relativamente alto. Se revela, además, que la amplificación es grande cuando la frecuencia de la perturbación y la frecuencia propia del sistema sean iguales, es decir, que el funcionamiento es crítico. Es probable que las primeras tentativas de usar bujes oscilantes con resortes antagonistas hayan producido ese efecto. Cuando la frecuencia de la perturbación es más alta que la frecuencia propia, es decir, que el funcionamiento es supercrítico, la amplificación es significativamente más baja.

Los casos antes mencionados ilustran las condiciones durante el funcionamiento normal. Una turbina eólica con una articulación oscilante que tenga una cierta rigidez, tiene además la ventaja de que los estados durante la turbulencia extrema y el gradiente transversal de la v_x del viento, lo que ocurre unas pocas veces durante la vida de funcionamiento de una turbina eólica, pueden manejarse con cargas y ángulos de oscilación razonables.

Las condiciones durante el funcionamiento normal determinan principalmente la fatiga de los materiales de la estructura, mientras que los estados de funcionamiento extremo son decisivos para las cargas extremas. Un buje con una cierta rigidez presenta un mejor equilibrio entre los casos de carga de fatiga y los casos de carga extrema.

El estudio como el que se ha descrito en lo que antecede ilustra que el funcionamiento en el margen de gran amplificación de la perturbación, es decir, cuando la frecuencia de la perturbación y la frecuencia propia sean iguales, deberá evitarse. Estos resultados han sido confirmados mediante simulaciones en el dominio del tiempo, con un modelo de turbina de ordenador razonablemente amplio, tomándose en dicho modelo en consideración correctamente la distri-

bución de masas, la aerodinámica estacionaria y la no estacionaria, las articulaciones, la rigidez, la amortiguación, la distribución del viento, el aumento de rigidez debido a la fuerza centrífuga, etc., para turbinas eólicas, a diferentes v_x es del viento. Las simulaciones han revelado que el momento en el buje llega a hacerse hasta diez veces mayor cuando la rigidez del buje tiene el valor crítico, en comparación con cuando tiene un valor más alto o más bajo.

Como se ha mencionado en lo que antecede, el grado en que resulta crítico depende de las relaciones entre la frecuencia de la perturbación, el factor de inercia másica de la turbina y la rigidez de la articulación oscilante. En la fase de construcción, esos valores pueden seleccionarse sin restricciones. La frecuencia de la perturbación es igual a la velocidad de rotación. El factor de inercia másica de la turbina se determina principalmente por la distribución de masas y por la configuración geométrica de las palas. Para una configuración geométrica de pala específica, el factor de inercia másica puede resultar influenciado por la elección de los materiales de construcción y por la adición de material de lastre. La rigidez de la articulación oscilante viene determinada por la rigidez de los diferentes elementos de la articulación, los cuales están normalmente hechos de caucho o de algún otro material elastómero. Por consiguiente, es relativamente fácil cambiar la rigidez, también en una articulación oscilante existente, intercambiando para ello los elementos de caucho por otros nuevos con un módulo de Young diferente, y posiblemente con una configuración geométrica modificada.

Para resumir, de acuerdo con el invento, el buje se construye de tal modo que el funcionamiento sea supercrítico o subcrítico. Poniendo en práctica el invento, las cargas disminuyen considerablemente, y se consiguen ventajas tanto técnicas como económicas.

Breve descripción de los dibujos

El invento se describirá además con detalle en lo que sigue, con referencia a los dibujos que se acompañan, en los cuales:

La Figura 1 ilustra como un sistema consistente en una masa, un resorte y un amortiguador, reacciona en general frente a perturbaciones de diferentes frecuencias;

La Figura 2 muestra la estructura principal de un aerogenerador con una turbina eólica de eje horizontal;

La Figura 3A representa una vista en alzado lateral, parcialmente en corte, de un buje oscilante de acuerdo con el invento, y la Figura 3B representa el buje oscilante como el ilustrado en la Figura 3A, en una vista en alzado frontal.

Descripción detallada de realizaciones del invento

En la Figura 1 se ha ilustrado como un sistema consistente en una masa, un resorte y un amortiguador reacciona en general frente a perturbaciones de diferentes frecuencias. La amplificación (en la dirección Y en la Figura 1), es decir, la relación de la amplitud del sistema a la amplitud de la perturbación, se ha representado como función de la relación de la frecuencia de la perturbación a la frecuencia propia del sistema (dirección X en la Figura 1). El punto A indica un estado en el cual la frecuencia de la perturbación, $\omega_{\text{perturbación}}$, es baja en relación con la frecuencia propia de la articulación oscilante, $\omega_{\text{resonancia}}$, es decir, que el funcionamiento es subcrítico, de acuerdo con la mecánica clásica, correspondiendo a un buje ideal con un grado de rigidez relativamente alto. La respuesta es ligeramente mayor que la perturbación, es decir, que la amplificación es ligeramente mayor que 1. En el punto B, la frecuencia de la perturbación y la frecuencia propia son iguales, es decir, que el funcionamiento es crítico. La amplificación de la perturbación es grande. El punto C indica un estado en el cual la frecuencia de la perturbación es más alta que la frecuencia propia, es decir, que el funcionamiento es supercrítico. La respuesta es más baja que en el punto A y significativamente más baja que en el punto B.

En la Figura 1 se ha ilustrado que el funcionamiento en el margen del punto B, en el cual hay una amplificación significativa de la perturbación, deberá evitarse.

En la Figura 2 se ha representado la estructura general de un aerogenerador con una turbina eólica de eje horizontal. Dos palas de turbina (1) de forma aerodinámica están conectadas al buje (2) con una conexión fija o pivotante (a lo largo del eje longitudinal). El buje (2) está conectado al eje (3) de la turbina, el cual está apoyado por los cojinetes (4). El eje (3) de la turbina está conectado a la caja de engranajes (5), la cual transforma la baja velocidad de rotación de la turbina en una velocidad de rotación adaptable al generador (6). Los componentes de la maquinaria están soportados por la bancada (7) de la maquinaria, la cual está conectada al cojinete de guiñada (8). El cojinete de guiñada (8) es giratorio en la torre (10), por medio del mecanismo de guiñada (9). La torre está conectada al terreno sólido por un cimiento (no representado). Las varias funciones pueden ser más o menos integradas entre sí, lo que sin embargo no afecta a la descripción que sigue.

En la Figura 2 se ha indicado que el buje (2) es un buje oscilante, lo cual implica que las dos palas de turbina (1) están conectadas rígidamente al buje (2). El buje (2) está articulado al eje (3) de la turbina, y puede oscilar en un ángulo A, como se ha ilustrado, en cada sentido.

El número de palas es normalmente de dos, pero en una realización preferida se aplica el principio de la estructura a una turbina con una pala, y se compensa la pala que falta con un contrapeso.

ES 2 282 406 T3

En la Figura 3 se ha representado un buje oscilante de acuerdo con el invento. Al igual que antes, las palas (1) está conectadas al buje (2), el cual es normalmente una estructura colada, y está conectado al eje (3) de la turbina por medio de un miembro de articulación. El miembro de articulación incluye un cojinete (12), el cual está normalmente compuesto de dos o de cuatro elementos de cojinete dispuestos simétricamente. Los elementos de resorte (13) contrarrestan el movimiento oscilante y pueden combinarse con amortiguadores, ya sea seleccionando para ello un material elástico con algunas propiedades de amortiguación, o ya sea proporcionando amortiguadores de algún otro tipo (no representados). La parte activa tanto del cojinete (12) como de los elementos de resorte (13) se hacen preferiblemente de material elastómero.

El cojinete (12) y los elementos de resorte (13) forman juntos un miembro de articulación (12, 13) que tiene una rigidez específica en relación con el eje del miembro de articulación, y por consiguiente con el cojinete. En una realización preferida, el cojinete (12) y los elementos de resorte (13) han sido integrados en una unidad, por ejemplo, una denominada viga de flexión. En este caso, así como cuando los componentes que son vecinos (principalmente las palas de turbina) tienen una cierta blandura inherente, la constante elástica de los elementos de resorte (13) puede incluir el impacto de esos elementos.

En realizaciones preferidas se pueden conseguir ventajas adicionales, haciendo para ello progresivo el resorte (13) (es decir, que la constante elástica aumente con el cambio dimensional), o haciéndolo pretensado. Se consigue un tipo especial de resorte progresivo cuando hay holgura entre el elemento de resorte y el elemento cooperante, lo que da por resultado una constante elástica que es cero durante la parte inicial del movimiento oscilante.

Como se ha descrito en lo que antecede, los parámetros estructurales deberán seleccionarse de tal modo que se evite el funcionamiento en el margen en el cual la frecuencia de la perturbación esté próxima a la frecuencia crítica, es decir, a la frecuencia propia de la articulación oscilante. En realizaciones preferidas, se seleccionan los parámetros de tal modo que la frecuencia de la perturbación sea o bien menor que 0,9 veces la frecuencia propia o bien más alta que 1,1 veces la frecuencia propia. Además, de acuerdo con realizaciones preferidas, la frecuencia de la perturbación es normalmente más alta que 0,1 veces la frecuencia propia y más baja que 10 veces la frecuencia propia. Por consiguiente, el margen entre 0,1 y 09 veces la frecuencia propia genera realizaciones preferidas especialmente interesantes con vistas a los requisitos de evitar las grandes cargas extremas, como se ha descrito en lo que antecede.

Como se ha descrito en lo que antecede, el invento y las realizaciones preferidas del invento, como las que se han descrito, entrañan ventajas técnicas y económicas esenciales cuando se aplican a aerogeneradores de una y de dos palas, en particular.

Las realizaciones preferidas como las que se han descrito en lo que antecede ilustran cómo puede aplicarse el invento a turbinas eólicas de una o de dos palas. Sin embargo, quienes sean expertos en la técnica pueden fácilmente aplicar el invento a turbinas eólicas con varias palas, y en áreas de aplicación próximas, tales como las de las hélices para aviones y para barcos, los ventiladores, las turbinas para otros medios de trabajo gaseosos o líquidos, etc.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Una turbina adaptada para un medio de trabajo gaseoso o líquido, en particular una turbina eólica para un aerogenerador, que comprende:
- un eje (3) que es giratorio con una cierta frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$),
- un buje (2) sobre el cual va unida al menos una pala de turbina (1), y
- 10 un miembro de articulación (12, 13) dispuesto entre dicho eje (3) y dicho buje (2) y que comprende un cojinete (12) y elementos de resorte (13), que ofrecen juntos una rigidez k contra movimientos en el miembro de articulación (12, 13),
- 15 teniendo dicha pala de turbina (1) un factor de inercia másica (J_{turbina}) con relación al miembro de articulación (12, 13) y estando adaptada para moverse a través de dicho flujo gaseoso o líquido, el cual tiene una dirección del flujo esencialmente perpendicular al plano de rotación de dicha pala de turbina (1), y tiene una velocidad del flujo variable en esa dirección, de tal modo que la turbina está expuesta a fuerzas de perturbación cuyo componente esencial tiene una frecuencia de la perturbación ($\omega_{\text{perturbación}}$) que está compuesta de dicha frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$), y
- 20 dicho miembro de articulación (12, 13) forma una articulación oscilante que tiene una frecuencia propia ($\omega_{\text{resonancia}}$) que se calcula mediante la expresión $\omega_{\text{resonancia}} = \sqrt{k/J_{\text{turbina}}}$
- caracterizado** porque la rigidez (k) de dicho miembro de articulación (12, 13),
- 25 el factor de inercia másica (J_{turbina}) de dicha pala de turbina (1) y
- la frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$)
- 30 se han seleccionado de tal modo que se cumple la condición de que $(\omega_{\text{rotación}}) = \sqrt{k/J_{\text{turbina}}}$.
2. Una turbina de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizada** porque la relación de la frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$) a la frecuencia propia de la articulación oscilante ($\omega_{\text{resonancia}}$) es de 0,9 como máximo.
- 35 3. Una turbina de acuerdo con la reivindicación 2, **caracterizada** porque la relación de la frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$) a la frecuencia propia de la articulación oscilante ($\omega_{\text{resonancia}}$) es de al menos 0,1.
4. Una turbina de acuerdo con la reivindicación 3, **caracterizada** porque la relación de la frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$) a la frecuencia propia de la articulación oscilante ($\omega_{\text{resonancia}}$) es de al menos 1,1.
- 40 5. Una turbina de acuerdo con la reivindicación 4, **caracterizada** porque la relación de la frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$) a la frecuencia propia de la articulación oscilante ($\omega_{\text{resonancia}}$) es de 10,0 como máximo.
6. Una turbina de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada** porque dicho miembro de articulación (12, 13) incluye amortiguadores.
7. Una turbina de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes **caracterizada** porque dichos elementos de resorte (13) son progresivos.
- 50 8. Una turbina de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada** porque dichos elementos de resorte (13) están pretensados.
9. Un aerogenerador con una turbina de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes.
- 55 10. Un método para diseñar una turbina adaptada para un medio de trabajo gaseoso o líquido, en particular una turbina eólica para un aerogenerador, comprendiendo dicha turbina un eje (3), el cual es giratorio con una cierta frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$), un buje (2) sobre el cual va unida al menos una pala de turbina (1), y un miembro de articulación (12, 13) dispuesto entre dicho eje (3) y dicho buje (2) y que comprende un cojinete (12) y elementos de resorte (13), que ofrecen juntos una rigidez k contra movimientos en el miembro de articulación (12, 13), teniendo
- 60 dicha pala de turbina (1) un factor de inercia másica (J_{turbina}) con relación al miembro de articulación (12, 13) y estando adaptada para moverse a través de dicho flujo gaseoso o líquido, el cual tiene una dirección del flujo esencialmente perpendicular al plano de rotación de dicha pala de turbina (1) y tiene una velocidad del flujo variable en esa dirección, de tal modo que la turbina está expuesta a fuerzas de perturbación cuya componente esencial tiene una frecuencia de la perturbación ($\omega_{\text{perturbación}}$) que está compuesta de dicha frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$), y que dicho miembro de
- 65 articulación (12, 13) forma una articulación oscilante que tiene una frecuencia propia ($\omega_{\text{resonancia}}$) que se calcula según la expresión $\omega_{\text{resonancia}} = \sqrt{k/J_{\text{turbina}}}$

caracterizado porque se seleccionan:

la rigidez (k) de dicho miembro de articulación (12, 13),

5 el factor de inercia másica (J_{turbina}) de dicha pala de turbina (1), y

la frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$),

10 de tal modo que se cumpla la condición de que $\omega_{\text{rotación}} = \sqrt{k/J_{\text{turbina}}}$.

11. Un método de acuerdo con la reivindicación 10, **caracterizado** porque se selecciona la rigidez (k) de dicha articulación (12, 13) de tal modo que se cumpla la condición de que $\omega_{\text{rotación}} = \sqrt{k/J_{\text{turbina}}}$ para la frecuencia angular ($\omega_{\text{rotación}}$) normal.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

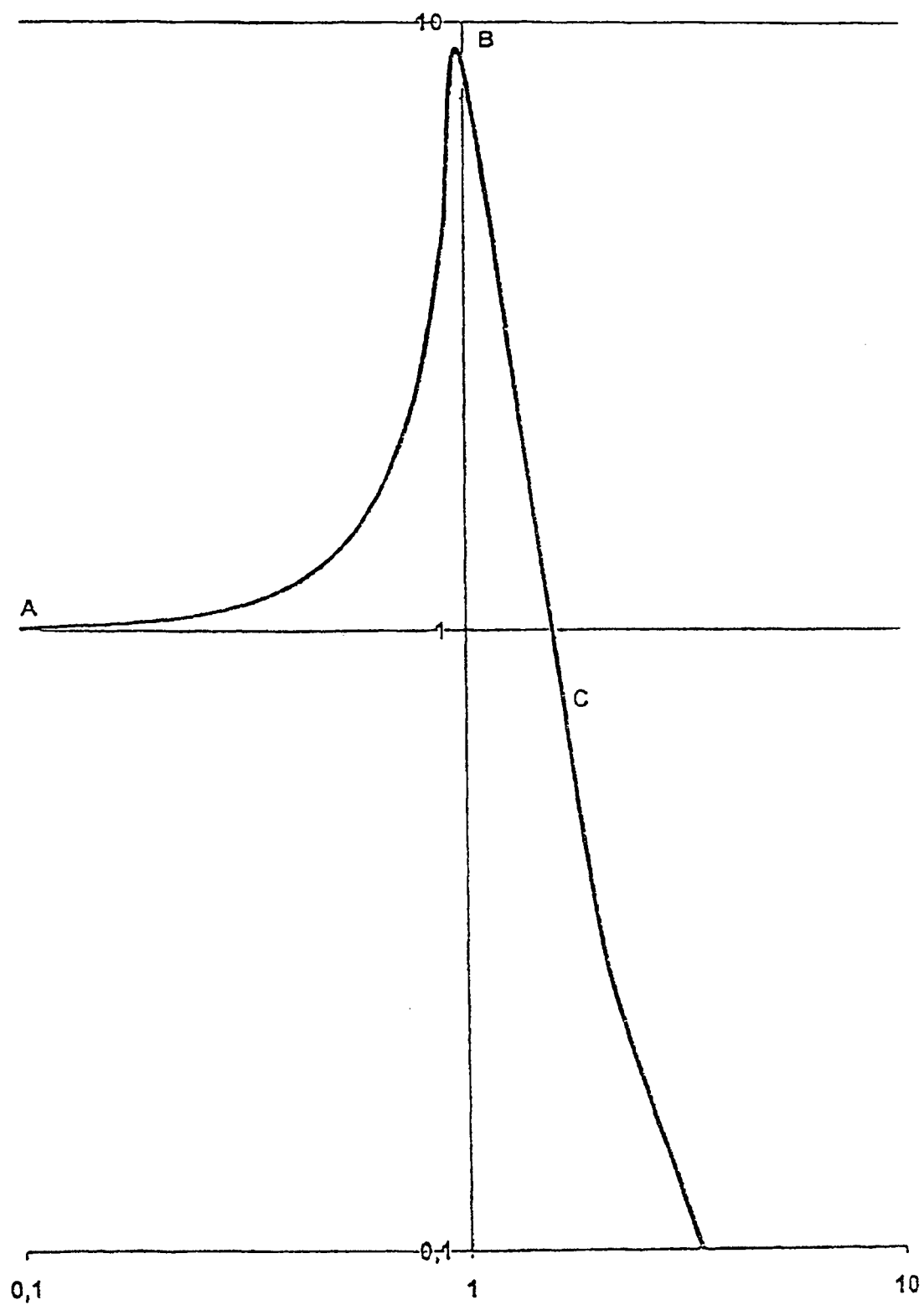


FIG 1

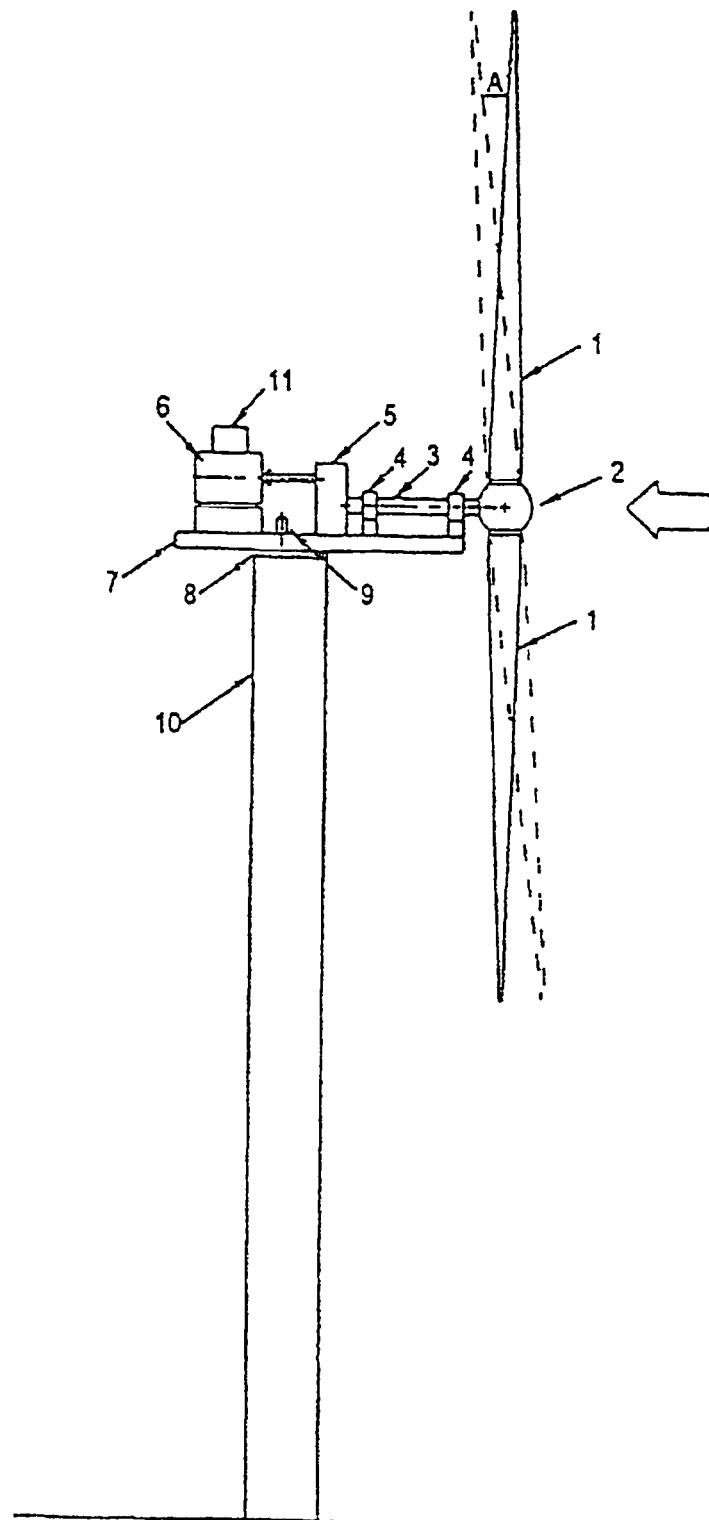


FIG 2

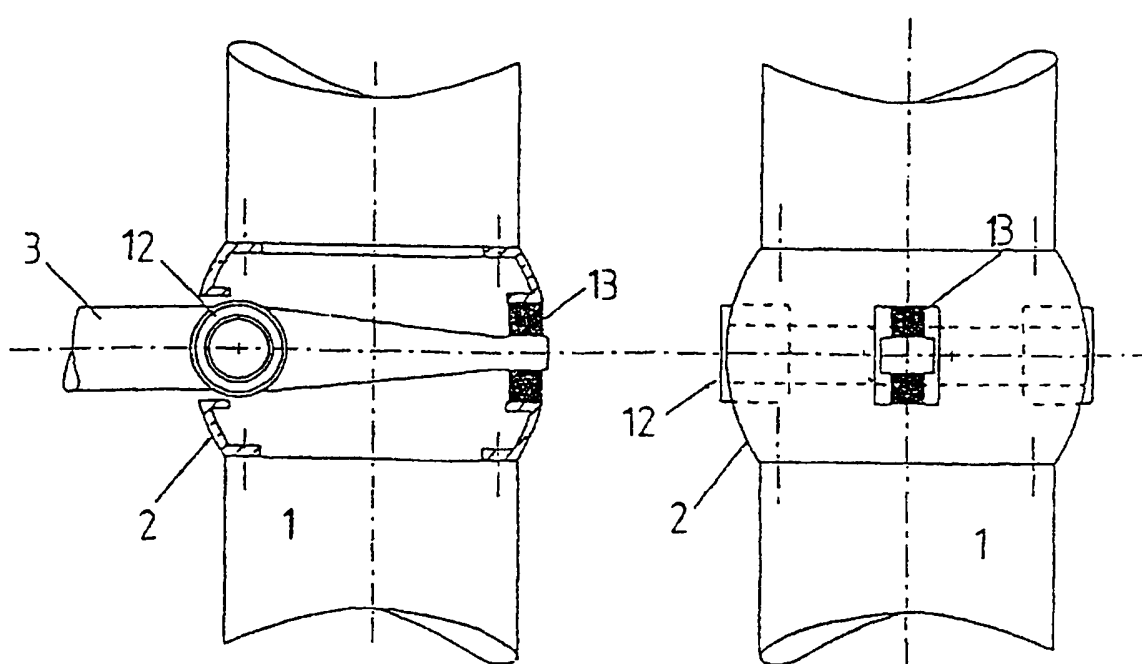


FIG 3A

FIG 3B