

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 643 044**

51 Int. Cl.:

F03D 13/25 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.11.2013** **E 13306596 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.08.2017** **EP 2746581**

54 Título: **Turbina eólica marina sobre soporte flotante desalineado**

30 Prioridad:

18.12.2012 FR 1203464

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

21.11.2017

73 Titular/es:

IFP ENERGIES NOUVELLES (100.0%)
1 & 4 avenue de Bois-Préau
92500 Rueil-Malmaison, FR

72 Inventor/es:

MABILE, CLAUDE y
GILLOTEAUX, JEAN-CHRISTOPHE

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 643 044 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Turbina eólica marina sobre soporte flotante desalineado

5 La presente invención se refiere al campo técnico de las turbinas eólicas marinas soportadas por unos soportes flotantes. Minimizar, incluso suprimir la pérdida de horizontalidad cuando se coloca una turbina eólica de eje horizontal (o verticalidad en el caso de las turbinas eólicas de eje vertical) sobre un flotador flotante es uno de los principales desafíos en la concepción de los soportes flotantes. La presente invención permite, con un flotador que
10 tenga un eje principal, mantener el eje de rotación de la turbina eólica perfectamente horizontal, o vertical, cualquiera que sea la fuerza del viento en el campo de funcionamiento de la turbina eólica.

Con el fin de aumentar la capacidad de producción de energía eléctrica en el mar, es necesario poder instalar las turbinas eólicas en unas grandes profundidades de agua. La industria considera generalmente que más allá de
15 50 metros de profundidad de agua es más económico situar la turbina eólica sobre un soporte flotante en lugar de utilizar un soporte fijado al fondo del mar.

Sin embargo, colocar una turbina eólica sobre un soporte flotante hace surgir varias dificultades, una de ellas la estabilidad hidrostática del sistema. En efecto las turbinas eólicas, tanto si son de eje horizontal (HAWT) como de eje vertical (VAWT) son unos sistemas masivos (varios centenares de toneladas) y cuyo centro de gravedad se
20 coloca a varias decenas de metros por encima del pie de la turbina eólica. Por ejemplo, una turbina eólica de 5 MW tiene una masa de aproximadamente 700 t (palas, góndola y mástil) cuyo centro de gravedad está a 70 m. Estas turbinas eólicas son por una parte sensibles a la inclinación de su eje de rotación porque esto disminuye la eficacia de la producción de energía, aunque también a los movimientos del soporte flotante que pueden generar unas grandes aceleraciones que se deben tener en cuenta para los cálculos de la estructura.

También, las principales restricciones de diseño de la arquitectura naval son minimizar el asiento del soporte flotante, así como sus amplitudes de movimiento. La amortiguación de los movimientos puede hacerse así
25 desfasando los periodos de resonancia del soporte flotante jugando con el tamaño de este último o por adición de placas. En lo que se refiere a la recuperación hidrostática, la arquitectura naval tiene pocos medios pasivos para controlar la escora. De hecho, el medio más eficaz es el concepto de TLP (Tension Leg Platform) que por su concepción del sistema de anclaje teóricamente no puede escorarse. Pero este modo de realización es costoso de construir e implementar en el emplazamiento.

Se ofrecen en la arquitectura naval otras soluciones de flotadores o de anclajes. Se citan, por ejemplo, una larga columna vertical lastrada y con unos anclajes de tipo catenaria. La masa del conjunto, lastres incluidos, y su forma
35 esbelta permiten minimizar los movimientos. Sin embargo, este principio no permite mantener el eje de la turbina eólica suficientemente horizontal, o vertical según su tipo. Por ejemplo, el control Hywind de Statoil (turbina eólica de 2,3 MW) comprende un flotador constituido por una columna de 100 m de altura por 8,3 m de diámetro y que está lastrada mediante 3600 toneladas de piedra, para un peso total de 5300 toneladas. Pese a estas dimensiones muy
40 grandes, se admite una escora estática de 3 grados. Ahora bien, la turbina eólica de Hywind es una "pequeña" turbina eólica comparada con lo que se prevé para las futuras turbinas eólicas marinas flotantes cuyo óptimo económico parece estar entre 7 y 10 MW.

Otro concepto consiste por el contrario en fijar la turbina eólica sobre un flotador anclado directamente al fondo del
45 mar y libre en rotación. La flotabilidad aportada por el flotador evita la inclinación del conjunto, pero por su mismo principio, este concepto no impide que la dirección del eje de la turbina eólica esté sometida a las consecuencias de las acometidas del viento, de las oleadas o de las corrientes.

Otro concepto, descrito en la solicitud de patente DE 10 2011 016 824 A1, consiste en realizar un enlace de rótula
50 entre el mástil y el flotador para mantener el mástil vertical.

De ese modo, la presente invención, se refiere a una turbina eólica marina sobre soporte flotante que incluye o bien un rotor de eje de rotación horizontal (HAWT), o bien un rotor de eje de rotación vertical (VAWT), estando montados dicho rotor sobre un soporte flotante que tiene un eje principal. Según la invención, el eje principal del soporte
55 flotante está desalineado con un ángulo fijo α con relación: o bien al eje de un mástil que soporta el rotor de eje de rotación horizontal, o bien al eje de rotación del rotor de eje de rotación vertical.

El soporte flotante puede incluir un lastre fijo en su base.

60 El soporte flotante puede incluir un sistema de lastrado hidráulico para desplazar una masa de líquido a lo largo del eje principal.

El soporte flotante puede comprender al menos dos depósitos, uno en la base y uno en la parte alta y un sistema de transferencia de líquido entre los dos depósitos.

65

Puede fijarse un sistema de anclaje al fondo del mar a la base del soporte flotante.

La turbina eólica puede incluir unos aparatos de medición de la inclinación y, unos medios de control del sistema de lastrado en función de la inclinación medida.

- 5 El soporte flotante puede ser de forma cilíndrica.
- El soporte flotante puede ser de forma de revolución.
- 10 La presente invención se comprenderá mejor con la lectura de la descripción que sigue, en ningún caso limitativa e ilustrada por las figuras adjuntas en el presente documento a continuación, entre las que:

- las figuras 1a y 1b representan esquemáticamente la turbina eólica según la invención, respectivamente una HAWT y una VAWT,
- 15 - la figura 2 representa el diagrama de las fuerzas sobre el sistema,
- la figura 3 da la nomenclatura utilizada en los cálculos,
- la figura 4 ilustra las ventajas de la presente invención.

20 Para solucionar los inconvenientes constatados en los diferentes conceptos de las "TLP", se propone construir una turbina eólica marina flotante desalineando con un ángulo determinado el eje del mástil para una HAWT, o el eje del rotor de la turbina eólica para una VAWT, con relación al eje principal del soporte flotante.

Según la figura 1a, el soporte flotante 1 es preferentemente de forma cilíndrica y se ancla al fondo del mar de manera preferencial mediante unas líneas catenarias 2 fijadas a la altura de la quilla 3.

25 El espacio interior del flotador está compartimentado en 4 volúmenes:

1. Un volumen V_p situado en la parte baja del flotador y constituido por un lastre permanente. Este puede ser por ejemplo de cemento o una masa de granalla, rocas o metales.
- 30 2. Un volumen V_1 situado por encima del volumen B_p y parcialmente relleno de líquido, por ejemplo, de agua de mar.
3. Un volumen V_2 situado en la cúspide del flotador y parcialmente relleno con un mismo líquido, por ejemplo, agua de mar.
- 35 4. Un volumen 4 que asegura la flotabilidad del conjunto: soporte flotante y turbina eólica 5, HAWT según la figura 1a y VAWT según la figura 1b.

El volumen V_p está totalmente lleno de un lastre sólido de masa B_p .

40 Los volúmenes V_1 y V_2 están parcialmente llenos de líquido con una cantidad respectiva B_1 y B_2 . Un sistema de conductos y de bombas P permite transferir una cantidad de líquido desde el volumen V_1 hacia V_2 . La transferencia inversa puede hacerse bien por gravedad o bien con ayuda de la bomba P . Por construcción, el volumen total de líquido $B_1 + B_2$, preferentemente agua de mar, que sirve de lastre móvil en el flotador, es fijo y se reparte en los volúmenes V_1 y V_2 .

45 La acción del viento sobre la turbina eólica, tanto si es HAWT como VAWT, induce unas fuerzas que tienden a hacer ladearse el flotador, se habla entonces de ángulo de asiento. La presencia de los lastres B_1 y B_2 permite de ese modo, en función de sus posiciones relativas y de su tasa de llenado, corregir este cambio de asiento. Se ha llevado a cabo un estudio de estabilidad con la geometría y las fuerzas representadas en la figura 2.

50 Nomenclatura:

- P_v : empuje debido al viento
- P_1 : fuerza debida al peso de la turbina eólica
- 55 ➤ P_2 : fuerza debida al peso del flotador
 - F_h : empuje de Arquímedes debido al volumen sumergido del flotador
- 60 ➤ F_1, F_2, F_p : fuerzas debidas a las masas de los lastres B_1, B_2 y B_p
- T_v, T_h : tracciones verticales y horizontales ejercidas por el sistema de anclaje
 - H_m : altura del mástil de la turbina eólica
 - 65 ➤ H_f, E_f : dimensiones dependientes de la longitud del flotador y del ángulo entre mástil y flotador

Las ecuaciones de equilibrio de las fuerzas son:

$$P_v + T_h = 0 \quad (1)$$

$$P_1 + F_2 + P_2 + F_1 + F_p + T_v - F_h = 0 \quad (2)$$

La ecuación de equilibrio de los momentos se calcula con relación al punto de anclaje de las amarras. Se considera que F_2 se aplica en la cabeza del flotador y que F_1 y F_p en los pies, esto no es estrictamente exacto, pero simplifica la comprensión del ejemplo descrito en el presente documento.

$$P_v \times (H_m + H_f) + F_2 \times E_f + P_2 \times E_f/2 + F_h \times E_f/2 = 0 \quad (3)$$

Considerando un anclaje de tipo catenaria, T_v , la tracción vertical del anclaje es, en primera aproximación, constante y no depende más que del tipo de anclaje elegido y de la profundidad del agua. Por definición $F_1 + F_2$ es también una constante porque esta suma representa la cantidad total de agua de mar contenida en el flotador y que sirve de lastre móvil. También, la ecuación (2) permite determinar el volumen que es necesario dar al flotador para generar un empuje suficiente para oponerse al conjunto de las fuerzas debidas a la gravedad.

La ecuación (3) puede escribirse también:

$$F_2 \times E_f = (-P_v \times (H_m + H_f) - P_2 \times E_f/2) + F_h \times E_f/2$$

o

$$F_2 = -P_v \times (H_m + H_f) / E_f + (F_h - P_2) / 2 \quad (4)$$

La ecuación 4 muestra que, si el empuje eólico P_v varía porque la velocidad del viento ha cambiado, se puede mantener el mástil de la turbina eólica vertical adaptando el volumen de agua del lastre B_2 para hacer variar F_2 .

En la ecuación 4 aparece la relación $(H_m + H_f) / E_f$. Esta relación depende de la longitud total del flotador L (figura 3) y del ángulo α fijado entre el eje del flotador y el del mástil de la turbina eólica para una HAWT. En efecto:

$$H_f = L \cos(\alpha)$$

$$E_f = L \sin(\alpha)$$

O sea:

$$(H_m + H_f) / E_f = (H_m + L \cos(\alpha)) / L \sin(\alpha)$$

Por construcción y según las condiciones de viento y las características de la turbina eólica, una elección razonable de la longitud L y del ángulo α entre el eje del flotador y el eje del mástil para una HAWT o el eje del rotor para VAWT permite optimizar la masa de agua B_2 .

La demostración que se acaba de hacer para una HAWT puede llevarse a cabo de la misma manera para una VAWT para llegar a las mismas conclusiones. En el caso de una VAWT, el eje del rotor corresponde al mástil de una turbina eólica HAWT.

Estudio de estabilidad hidrostática sin fuerza de empuje del efecto vela

Intervienen cinco parámetros principales en el estudio de estabilidad de este concepto:

1. La longitud L del flotador
2. El diámetro D del flotador
3. El ángulo α entre el eje del flotador y el del mástil
4. El lastre B_p permanente en el fondo del flotador
5. El lastre variable B_1 para mantener el mástil de la turbina eólica vertical, sabiendo que $B_1 + B_2$ es una constante para L y D fijos.

Un primer estudio consiste en hacer variar el reparto del lastre B_p y del volumen de fluido $B_1 + B_2$ para una configuración geométrica dada (inclinación, longitud, diámetro), y examinar de ese modo cuáles son los mejores parámetros L , D y α en términos de estabilidad hidrostática del soporte flotante.

Las sub-figuras de la figura 4 muestran de ese modo la variación del ángulo de asiento (Trim) del soporte flotante en función del porcentaje del lastre B_p con relación a la masa total (MB) del lastre y el porcentaje de fluido en el volumen V_2 con relación a la masa total de fluido $B_1 + B_2$. Estas tres sub-figuras representan los resultados para

tres inclinaciones de soporte diferentes (20°, 30°, 40°) cuando el flotador tiene una longitud de 80 m, y un diámetro de 20 m. Se observa entonces que cuando la inclinación se fija a 40° aparecen numerosas soluciones inestables (zonas blancas) o dando un gran ángulo de asiento. Se ve igualmente que existe para cada par de parámetros una solución de ángulo de asiento nulo, este resultado es sin embargo ponderado por el hecho de que para una desviación reducida en lastre dinámico o permanente el soporte se convierte rápidamente en inestable. Por el contrario, para los otros ángulos de inclinación (20° y 30°), el soporte flotante es estable cualquiera que sea el reparto del lastre y presenta unas soluciones de ángulo de asiento nulo. Se puede observar igualmente que, de manera general, cuanto mayor es el ángulo de inclinación más se estrechan las curvas de igual asiento alrededor de 0° y por tanto más sensibles al reparto del lastre.

Estudio de estabilidad hidrostática con fuerza de empuje máxima del efecto vela

Habiendo permitido el primer estudio identificar los repartos de lastre plausibles para unas configuraciones geométricas dadas, la etapa siguiente consiste en observar cómo se comporta el flotador cuando funciona la turbina eólica. La presencia de la góndola y de las palas de la turbina eólica se representa simplemente por una fuerza de empuje constante de 80 toneladas que es representativa de la fuerza de empuje máxima generada por una turbina eólica de eje horizontal de 5 MW cuando esta gira a velocidad nominal.

La tabla del presente documento muestra a continuación de ese modo la masa de agua que es necesario tener en el lastre B1 para obtener un ángulo de asiento nulo para seis configuraciones geométricas dadas. Se han mantenido dos ángulos de inclinación α diferentes (20° y 30°) así como tres longitudes de soporte (60 m, 80 m y 100 m). Para cada configuración, se elige el reparto de lastre dado para una fuerza de empuje nula y se hace variar el reparto del lastre dinámico con el fin de corregir el ángulo de asiento hasta obtener un ángulo de asiento nulo. Se observa entonces que la transferencia de agua es muy reducida en porcentaje, del orden del 5 %, con relación a la configuración sin fuerza de empuje.

B2		Longitud del flotador L (m)		
		60	80	100
Ángulo α (grados)	20	544 t	733 t	922 t
	30	435 t	733 t	1110 t

Se han llevado a cabo también otros estudios como la influencia de un cambio de eje en el empuje del viento.

Cuando el viento cambia rápidamente de dirección, la turbina eólica, el empuje del viento sobre la turbina eólica ya no está en el plano constituido por el mástil y el flotador. Estos estudios han mostrado que la turbina eólica se inclina entonces algunos grados, pero permanece sin embargo estable. Debido a que el eje de empuje del viento está desplazado con relación al punto de anclaje, la turbina eólica se alineará automáticamente en la dirección del viento.

Esta acción no será inmediata, pero, después de algunos minutos, el empuje del viento volverá al plano constituido por el eje del mástil de la turbina eólica y el del flotador. De ese modo, se enderezará el conjunto.

Estas simulaciones muestran por un lado que el concepto es estable con la condición de una elección oportuna de los principales parámetros de dimensionamiento, pero también que el lastre dinámico para mantener el mástil de la turbina eólica para una HAWT, o el eje de rotación vertical para una VAWT, es totalmente realizable

De ese modo, la presente invención está constituida por un flotador de forma simple sobre el que se coloca la turbina eólica de tal manera que el eje principal del flotador y el eje de referencia de la turbina eólica forman un ángulo constante. Este concepto permite mantener el eje de la turbina eólica horizontal para una HAWT o el eje de rotación vertical para una VAWT, desplazando un líquido de un lastre al otro. Se ha mostrado que, si las condiciones del viento llegan a cambiar, la turbina eólica se inclinará, pero, o bien por lastre en caso de cambio de la fuerza del viento, o bien mediante un realineamiento natural en caso de cambio de la dirección del viento, la turbina eólica volverá a encontrar una posición que garantizará una producción de electricidad óptima.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Turbina eólica marina sobre soporte flotante (1) que incluye o bien un rotor de eje de rotación horizontal (HAWT), o bien un rotor de eje de rotación vertical (VAWT), estando montado dicho rotor sobre un soporte flotante que tiene un eje principal, caracterizada por que dicho eje principal del soporte flotante está desalineado en un ángulo α fijo con relación: o bien al eje de un mástil que soporta el rotor de eje de rotación horizontal, o bien al eje de rotación del rotor de eje de rotación vertical.
- 10 2. Turbina eólica según la reivindicación 1, en la que dicho soporte flotante incluye un lastre fijo en su base (BP).
3. Turbina eólica según una de las reivindicaciones 1 o 2, en la que dicho soporte flotante incluye un sistema de lastrado hidráulico para desplazar una masa de líquido a lo largo del eje principal.
- 15 4. Turbina eólica según la reivindicación 3, en la que dicho soporte flotante comprende al menos dos depósitos, uno en la base y uno en la parte alta y un sistema de transferencia de líquido entre dichos dos depósitos.
5. Turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores, en la que se fija a la base del soporte flotante un sistema de anclaje al fondo del mar.
- 20 6. Turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores, que incluye unos aparatos de medición de la inclinación y, unos medios de control del sistema de lastrado en función de la inclinación medida.
7. Turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho soporte flotante es de forma cilíndrica.
- 25 8. Turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho soporte flotante es de forma de revolución.

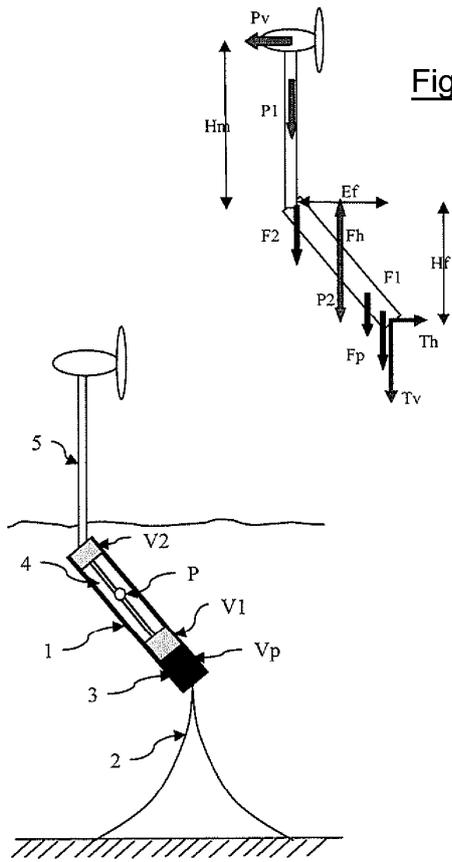


Figura 1a

Figura 2

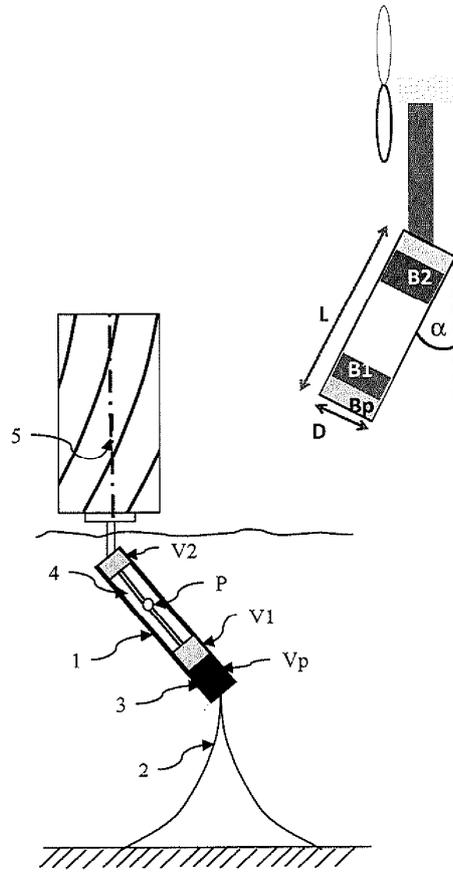
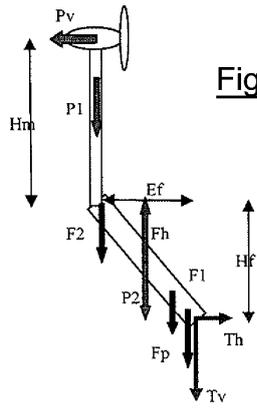
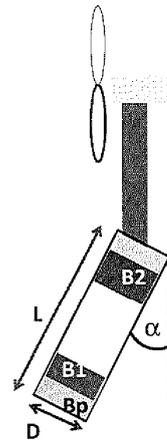


Figura 1b

Figura 3



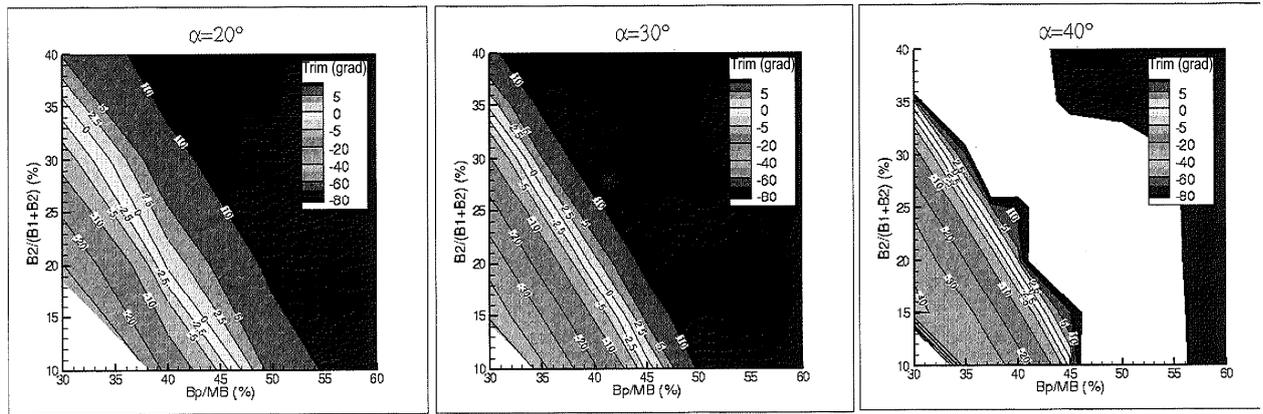


Figura 4