

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 714 686**

51 Int. Cl.:

F03D 13/20

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.03.2014** **PCT/FR2014/050712**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.11.2014** **WO14184454**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.03.2014** **E 14719046 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.12.2018** **EP 2997257**

54 Título: **Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante que incluye una combinación de medios de amortiguación**

30 Prioridad:

17.05.2013 FR 1354474

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

29.05.2019

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**GILLOTEAUX, JEAN-CHRISTOPHE;
POIRETTE, YANN;
POURTIER, ALICE;
BOZONNET, PAULINE;
FERRER, GILLES;
PAPON, GÉRARD;
PERDRIZET, TIMOTHÉE y
SAEEDI, NAVID**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 714 686 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 costa afuera sobre soporte flotante que incluye una combinación de medios de amortiguación

5 La presente invención se refiere al campo de las turbinas eólicas en el mar (costa afuera), en particular, las turbinas eólicas montadas sobre un soporte flotante amarrado en el fondo del mar. Uno de los problemas que se propone resolver la invención es la estabilidad de la turbina eólica, con el fin de que el plano de las palas permanezca en una posición óptima para el suministro de la potencia y esto en las mejores condiciones.

10 Diversos soportes flotantes dedicados a la instalación de turbinas eólicas de varios megavatios mar adentro de las costas están en transcurso de desarrollo en unos numerosos países. Según la profundidad del sitio considerado, se pueden considerar varias opciones de diseño. A pesar de su gran diversidad, surgen tres grandes familias de soporte flotante según la naturaleza del par de rectificación hidrostática empleado. Se pueden citar:

- 15 - los flotadores de tipo SPAR caracterizados por una forma geométrica estilizada y que incluyen un lastre importante, con el fin de bajar al máximo el centro de gravedad del conjunto de la estructura con la finalidad de asegurar la estabilidad,
- los soportes de tipo TLP (Tension Leg Platform) que tienen la particularidad de estar amarrados en el fondo del
- 20 mar por unos cables tendidos que garantizan la estabilidad de la estructura,
- los flotadores de tipo semisumergibles que presentan un momento de inercia en la superficie de flotación importante que, de este modo, les procura un par de rectificación suficiente para su estabilidad.

25 En cuanto a rectificación hidrostática, los flotadores de tipo barcaza hay que clasificarlos en la categoría de las plataformas semisumergibles debido a su superficie para la flotación importante, pero, sin embargo, difieren de estas últimas debido a su aspecto mucho más compacto.

30 Sin embargo, en el campo de las turbinas eólicas costa afuera, que presentan, en particular, unas esbelteces aéreas muy importantes, los soportes flotantes convencionales no siempre están adaptados para las restricciones de funcionamiento del rotor. Siendo las turbinas eólicas costa afuera, por una parte, sensibles a la inclinación de su eje de rotación y, por otra parte, a las aceleraciones importantes al nivel de la góndola, todo el trabajo de diseño de los soportes flotantes reside, por lo tanto, en satisfacer al menos estas dos restricciones evitando al mismo tiempo tener un coste prohibitivo. Algunos ejemplos de turbinas eólicas costa afuera flotantes se conocen, por ejemplo, por los

35 documentos internacionales WO 2012/169914 y WO 03/004869.

La presente invención se refiere a una turbina eólica costa afuera sobre un soporte flotante que incluye en combinación:

- 40 - un flotador principal que incluye una parte de forma sustancialmente cilíndrica,
- un elemento circular de hormigón de diámetro D_d superior al diámetro D_c del flotador principal que constituye a la vez una masa fija en la base del flotador y unos medios de amortiguación,
- unos medios complementarios de lastrado permanente (4) situados en la base del flotador principal,
- 45 - unos cajones de lastrado dinámico incluidos en el flotador principal y repartidos en corona en la periferia de dicho flotador.

Según la invención, la proporción diámetro D_c /calado puede estar comprendida entre 1,3 y 1.

50 El diámetro exterior D_d de la falda puede estar comprendido entre 1,5 y 2 veces el diámetro del flotador D_c y preferentemente cercano a 1,75.

La falda puede tener un espesor decreciente en dirección de su diámetro exterior.

55 El lastre permanente en la base del flotador principal puede estar constituido por hormigón o agua o una combinación de los dos.

Un sistema de anclaje funicular puede mantener la turbina eólica en su sitio.

60 La turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante puede tener el eje de las palas horizontal.

La turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante puede tener el eje de las palas vertical.

65 La presente invención se comprenderá mejor y sus ventajas se pondrán de manifiesto de manera más clara con la lectura de la descripción que sigue de un modo de realización preferente, de ninguna manera limitativo e ilustrado por las figuras a continuación adjuntas, de entre las que:

- la figura 1 muestra de manera esquemática el conjunto de turbina eólica sobre su soporte flotante,
- la figura 2 da la evolución del asiento de un soporte flotante de forma cilíndrica en función de su radio y del calado,
- la figura 3 muestra la influencia del diámetro D_d sobre la frecuencia de resonancia en arfada,
- la figura 4 muestra de manera esquemática en corte una geometría de la "falda",
- 5 - las figuras 5a, 5b y 5c representan tres ejemplos de constitución del lastre permanente y de los cajones de lastrado dinámico,
- las figuras 6a y 6b ilustran los cajones de lastrado,
- la figura 7 ilustra la geometría de los cajones de lastrado para un ángulo de asiento diana de 5° .

10 En la figura 1, el soporte flotante está compuesto por un flotador principal 1 que incluye al menos una parte de geometría cilíndrica (circular) al que se añade en la parte inferior una placa de amortiguador 2, también denominada "falda". Es en esta parte cilíndrica donde se inscribe la combinación de los diferentes medios de lastrado: permanente y dinámico. La parte superior del flotador principal puede tener otras formas exteriores, como cónica, cilíndrica de diámetro diferente, adaptadas para los flujos hidrodinámicos. Un lastre permanente 4, necesario para el control del equilibrio hidrostático, está colocado en el fondo de flotador que puede estar constituido por hormigón, por agua de mar o cualquier materia sólida o líquida pesada. Las masas de estas diferentes materias están repartidas para satisfacer a la vez los criterios de estabilidad estática y dinámica, pero también para minimizar el coste de fabricación. Por encima del lastre permanente 4 y en la periferia del flotador principal 1 en el interior del cilindro, están dispuestos varios compartimentos 3 cuyos volúmenes pueden estar lastrados o deslastrados según las condiciones de funcionamiento de la turbina eólica 6. El empuje aerodinámico asociado al funcionamiento de la turbina eólica modifica el ángulo de asiento de la plataforma. Los lastres 3 permiten corregir y regular este ángulo de asiento y, por lo tanto, del eje de la turbina eólica. La plataforma está equipada con conductos y con bombas que permiten transferir una cantidad de líquido en los diferentes volúmenes, estando el volumen total de líquido mantenido, de manera general, constante.

25 Las dimensiones del flotado principal son tales que la proporción diámetro D_c /calado permanece comprendida entre 1,3 y 1, es decir, alejada de la forma estilizada de las boyas SPAR.

30 La turbina eólica, ya sea de eje horizontal (HAWT "Horizontal Axis Wind Turbine") o de eje vertical (VAWT "Vertical Axis Wind Turbine"), genera un empuje horizontal inducido por el viento al que se añaden las fuerzas de arrastres sobre la góndola y el mástil de la turbina eólica. Estas fuerzas tienen tendencia a hacer inclinarse la estructura flotante: entonces, se habla de cambio de ángulo de asiento. Modificando el reparto de líquido en los lastres, de este modo, se puede hacer lo necesario para reducir las variaciones del ángulo de asiento del soporte. De este modo, la turbina eólica funciona de manera óptima y se previene cualquier riesgo de fatiga de los diferentes componentes mecánicos.

35 Como primera aproximación, el dimensionado de una plataforma que soporta una turbina eólica debe satisfacer dos restricciones principales, esto es:

- tener un volumen sumergido suficiente para soportar el peso de la turbina eólica, de su sistema de amarre, así como su propio peso,
- 40 - presentar un par de rectificación suficiente para poder contener el esfuerzo máximo de empuje aerodinámico de la turbina eólica considerado.

45 Considerando unos desplazamientos de escasa rotación, estas dos restricciones pueden traducirse matemáticamente por las siguientes relaciones:

$$\begin{cases} \rho V = M_{tot} \\ F_T \cdot (H_{cubo} + Z_{CG}) = \left(\rho V g Z_{CB} - M_{tot} g Z_{CG} + \rho g \pi \frac{D_c^4}{8} + C_{ss, líneas} \right) \cdot \theta \end{cases}$$

con

- ρ : masa volumétrica del agua (kg/m^3),
- g : la gravedad (m/s^2),
- M_{tot} : masa total de la estructura (Kg),
- V : volumen sumergido (m^3),
- 55 F_T : fuerza de empuje aerodinámico al nivel del cubo (N),
- H_{cubo} : altitud del cubo (m),
- Z_{CG} : posición vertical del centro de gravedad del conjunto de la estructura (m),
- Z_B : centro de flotación (m),
- D_c : diámetro del flotador (m),
- 60 D_d : diámetro de las faldas (m),

C₅₅, líneas: rigidez en cabeceo asociada al amarre (N.m/rad),
θ: ángulo de asiento (rad).

La figura 2 muestra la evolución del ángulo de asiento (Trim) de un soporte flotante de forma cilíndrica en función de su radio (radius) y de su calado (Draft) cuando este está sometido al momento asociado al empuje máximo de una turbina eólica de eje horizontal de 5 MW. Las zonas blancas corresponden a las configuraciones donde el soporte flotante no es estable. Este género de resultado permite, por lo tanto, dar cuenta de las diferentes configuraciones posibles según el ángulo de asiento deseado.

El añadido de faldas tiene como finalidad desfasar el periodo de resonancia en arfada, o movimiento de oscilación vertical, del soporte flotante fuera de los periodos predominantes de marejada (de manera general, estos periodos de marejada están contenidos en un espectro que se extiende de 3 s a 20 s) donde la energía de las olas está principalmente concentrada, de modo que se reduzcan las amplitudes de los desplazamientos verticales de la estructura y, de este modo, se aseguren unas condiciones óptimas de funcionamiento del rotor de la turbina eólica. En el caso de un flotador cilíndrico y de dos faldas circulares, este periodo de resonancia en arfada puede calcularse a través de la siguiente relación:

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{M_{tot} + m_{adi}(\infty)}{K_{HZ}}}$$

que vincula el periodo de resonancia en arfada T_z a la masa total M_{tot} de la estructura (amarre, turbina eólica, flotador), a la masa de agua añadida para una frecuencia infinita $m_{adi}(\infty)$ asociada, así como al término de rigidez hidrostática en arfada K_{HZ} , con:

$$\begin{cases} K_{HZ} = \rho\pi \frac{D_c^2}{4} \\ m_{adi}(\infty) = \frac{1}{3} \rho D_d^3 \end{cases}$$

con D_d diámetro de la "falda".

De este modo, un estudio paramétrico ha consistido en estimar la influencia del diámetro de la placa de amortiguador ("falda") sobre el periodo de resonancia en arfada (Figura 3).

Estos resultados muestran, en primer lugar, que el añadido de una placa de amortiguador mejora de manera clara las prestaciones de una plataforma del tipo barcaza. Por lo tanto, se señala que una elección oportuna de los principales parámetros de dimensionado del flotador y de las faldas permite desfasar de manera eficaz el periodo de resonancia en arfada fuera de los periodos predominantes de marejada.

El primer papel de la falda es desfasar las frecuencias propias en arfada, como se ha explicado anteriormente. Además, de manera que se mejore la estabilidad del flotador, la utilización de la falda como un volumen de lastre permanente resulta una construcción muy interesante. En efecto, la falda está situada en el extremo inferior del flotador y su volumen puede ser potencialmente importante, en concreto, teniendo en cuenta su diámetro exterior elevado. La presente invención añade una función de lastre permanente al elemento "falda". Su forma es preferentemente cónica. El espesor sobre el diámetro exterior está disminuido para no tener un efecto hidrodinámico negativo, en concreto, para el desfase de las frecuencias propias. Sobre el diámetro interior, el espesor está aumentado de manera considerable para permitir una masa de lastre lo más elevada posible. Los estudios hidrodinámicos han mostrado que era preferible tener un espesor máximo sobre el diámetro exterior de aproximadamente 0,5 m y que un ángulo de cono del orden de 7,5 ° permanecía aceptable. Teniendo en cuenta estas restricciones, la geometría de la falda preferible es, por ejemplo, la representada en la figura 4.

La consistencia de la falda de hormigón se ha verificado en presión, representativa de la presión hidrodinámica ejercida durante los movimientos de arfada del flotador en presencia de una marejada quinquenal del Atlántico norte con un periodo de pico de marejada cercano al periodo de resonancia en arfada. La falda podrá estar realizada con otros materiales, en caso necesario, o llena parcialmente de hormigón y de otro material, sólido o líquido. Unos estudios han permitido estimar los esfuerzos hidrodinámicos sobre la falda. A partir de este dato de entrada, se ha realizado un cálculo de elementos finitos sobre Abaqus para verificar la consistencia mecánica de esta estructura de hormigón. Los resultados en restricción en la estructura de hormigón, que se supone sin refuerzo de acero (los armazones eventuales tendrán tendencia a reducir las restricciones en el hormigón), muestran que la restricción máxima de Von Mises es de

manera muy clara inferior a 5 MPa, la restricción en tracción S11 es como máximo de 2,4 MPa. Estos valores muestran que el hormigón permanece en el campo elástico, tanto en tracción como en compresión. Su consistencia mecánica está asegurada, por lo tanto, bajo los esfuerzos de presión hidrodinámicos evaluados.

5 El lastre complementario permanente puede estar constituido por hormigón, por agua, por cualesquiera otros materiales sólido o líquido o por una combinación de estos materiales. El lastre permanente debe ser de densidad media suficiente para asegurar la estabilidad hidrostática del soporte flotante, teniendo en cuenta el volumen útil de la plataforma (volumen del flotador principal + volumen de la falda + volumen del lastre dinámico).

10 La utilización de una combinación de materiales, hormigón + agua, por ejemplo, permite beneficiarse de la densidad del hormigón reduciendo los costes. El reparto de los dos materiales tendrá un impacto sobre la cantidad de lastre dinámico necesario y sobre el periodo en cabeceo del soporte. En efecto, cualquier modificación de la distribución hormigón/agua va a modificar el centro de gravedad del soporte, por una parte, y su inercia, por otra parte.

15 En el siguiente ejemplo (figuras 5a, 5b, 5c), se ha considerado el caso donde el lastre complementario permanente está constituido por hormigón únicamente (caso 1) y dos combinaciones de hormigón y de agua (caso 2 y caso 3). En todos los casos, la falda es de hormigón.

20 En el caso 5a, el lastre está completamente constituido por una materia sólida como el hormigón. En el caso 5b, una parte del hormigón se ha sustituido por un lastre permanente hecho de un líquido como agua de mar. Por último, en el caso 5c, se ha buscado minimizar la masa de hormigón salvaguardando al mismo tiempo su integridad estructural. En estas figuras, los cajones de lastrado están situados por encima del lastre permanente, pero se pueden concebir unas configuraciones que tengan como propósito posicionar estos cajones de lastrado más bajos

25 La Tabla de más abajo muestra la influencia de la distribución del lastre permanente sobre el lastre dinámico y el periodo propio en cabeceo.

	Caso 5a	Caso 5b	Caso 5c
Masa de agua en los cajones de lastrado	375 t	460 t	605 t
Periodo propio en cabeceo	28 s	32 s	40 s

30 El lastre dinámico considerado consiste en llenar los depósitos 3 colocados en la periferia del soporte flotante con un líquido. Los parámetros de dimensionado son: un ángulo α que define el reparto angular de los compartimentos del lastre a cada lado del eje de empuje, una anchura de depósito anotada como an , así como una altura al de llenado (figuras 6a y 6b)

35 Con geometría de flotador principal y de faldas fijada (radio 13 m), calado 20,5 m), se ha llevado a cabo un estudio paramétrico, con el fin de saber qué altura de agua era necesaria para alcanzar un ángulo de asiento diana según el reparto angular α y la anchura an de depósito. La Figura 7 muestra, de este modo, la altura de agua alt necesaria para obtener un ángulo de asiento de 5° en presencia de una fuerza de empuje aerodinámico de 80 toneladas en el centro del rotor situado a 90 m de altura para unas anchuras de depósito an comprendido entre 1 y 4 m, un ángulo α comprendido entre 10° y 45° . De este modo, puede elegirse la mejor configuración según los criterios por los que se opte (volumen de líquido, altura metacéntrica,...).

45 Estos resultados muestran que una turbina eólica HAWT o VAWT montada sobre un soporte flotante tal como el de la presente invención puede mantenerse lo suficientemente estable con la condición de una elección específica de los principales parámetros de dimensionado. Por otra parte, el lastrado dinámico dispuesto en combinación en el flotador principal puede con un asiento correcto para la recuperación de energía óptima.

50 La combinación de una falda de dimensión optimizada y fabricada de material pesado tal como el hormigón o equivalente, de un lastre permanente que permite regular la masa total pesada en la base del flotador en función de la turbina eólica y de las condiciones medioambientales, de lastre dinámico para controlar el ángulo de asiento de la turbina eólica, demuestra que presenta muchas ventajas, tanto técnicas como económicas, y perfectamente adaptada para un soporte flotante que lleva una turbina eólica de fuerte potencia.

55 El amarre de este soporte flotante puede estar constituido por 3 líneas 5 de anclaje catenario repartidas a 120° . Cada una de las líneas está constituida por una cadena sujeta a dos puntos de sujeción de las líneas de ancla ("fairleads") sobre el soporte flotante con la ayuda de una conexión en Y (o "crowfoot"). Este tipo de conexión permite aportar rigidez en guiñada intrínsecamente escasa sobre este tipo de soporte.

60 Por otra parte, los puntos de sujeción de las líneas de ancla están situados al nivel del francobordo del soporte y no, como es este el caso a menudo, al nivel del calado. Esto permite aportar rigidez en cabeceo y reducir el asiento del soporte flotante bajo el efecto del empuje sobre la turbina. Como contrapartida; el cabeceo puede, bajo algunas

condiciones medioambientales, estar acentuado. Entonces, hay que encontrar un compromiso entre la ganancia sobre el asiento y el cabeceo máximo que se puede permitir en función de las condiciones operativas.

- 5 Cada línea puede estar equipada, igualmente, con una masa puntual adicional que tiene dos intereses principales: el primero, evitar los esfuerzos de compresión sobre toda la longitud de la cadena y el segundo, aportar rigidez suplementaria en guiñada y disminuir el acoplamiento guiñada/balanceo que se observa, a veces, sobre los soportes cilíndricos.

REIVINDICACIONES

1. Turbina eólica costa afuera (6) sobre un soporte flotante que incluye en combinación:

- 5 - un flotador principal (1) que incluye una parte de forma sustancialmente cilíndrica,
 - un elemento circular (2) de hormigón de diámetro D_d superior al diámetro D_c del flotador principal (1) que
 constituye a la vez una masa fija en la base del flotador y unos medios de amortiguación,
 - unos medios complementarios de lastrado permanente (4) situados en la base del flotador principal,
10 - unos cajones de lastrado dinámico (3) incluidos en el flotador principal y repartidos en corona en la periferia de
 dicho flotador.

2. Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante según la reivindicación 1, en la que la proporción diámetro D_c /calado está comprendida entre 1,3 y 1.

15 3. Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el diámetro exterior D_d de dicho elemento circular está comprendido entre 1,5 y 2 veces el diámetro del flotador D_c y preferentemente cercano a 1,75.

20 4. Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante según una de las reivindicaciones anteriores, en la que dicho elemento circular tiene un espesor decreciente en dirección de su diámetro exterior.

5. Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el lastre permanente 4 en la base del flotador principal está constituido por hormigón o agua o una combinación de los dos.

25 6. Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante según una de las reivindicaciones anteriores, en la que un sistema de anclaje funicular (5) la mantiene en su sitio.

30 7. Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante según una de las reivindicaciones anteriores, en la que el eje de las palas es horizontal.

8. Turbina eólica costa afuera sobre soporte flotante según una de las reivindicaciones 1 a 6, en la que el eje de las palas es vertical.

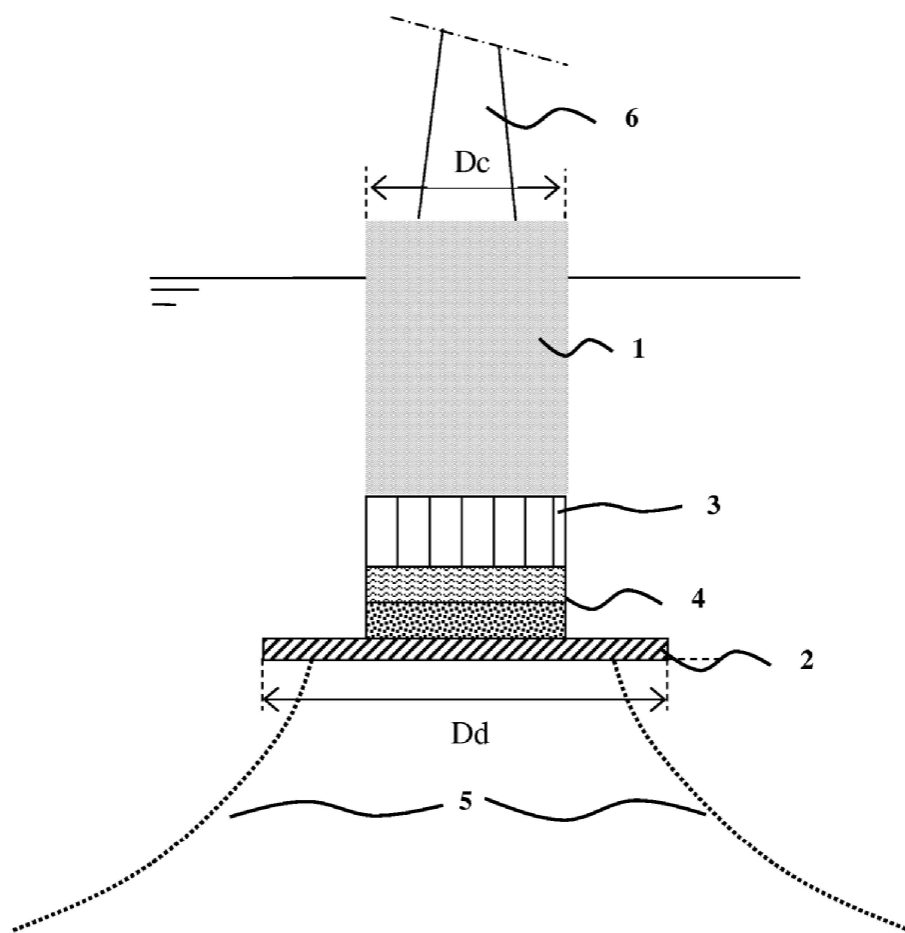


Figura 1

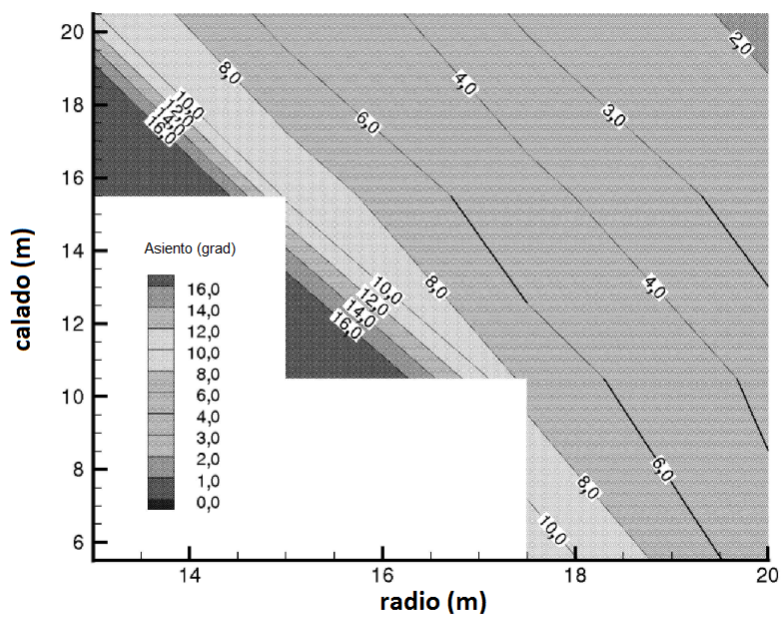


Figura 2

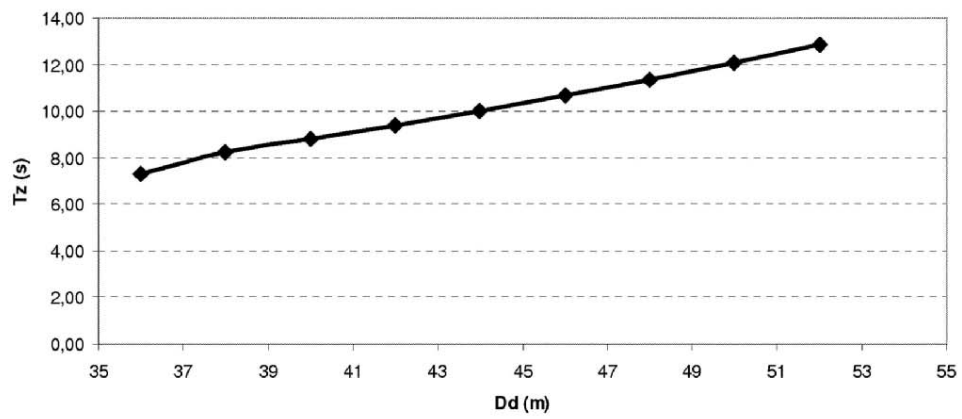


Figura 3

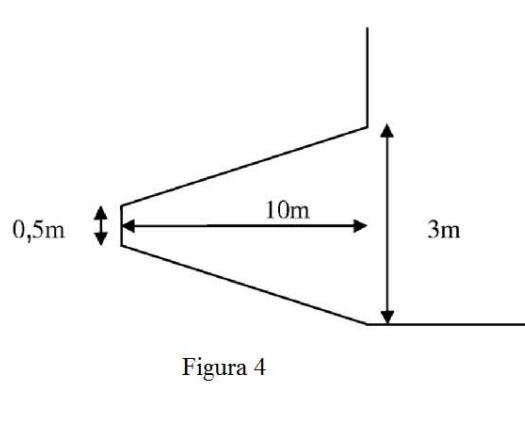
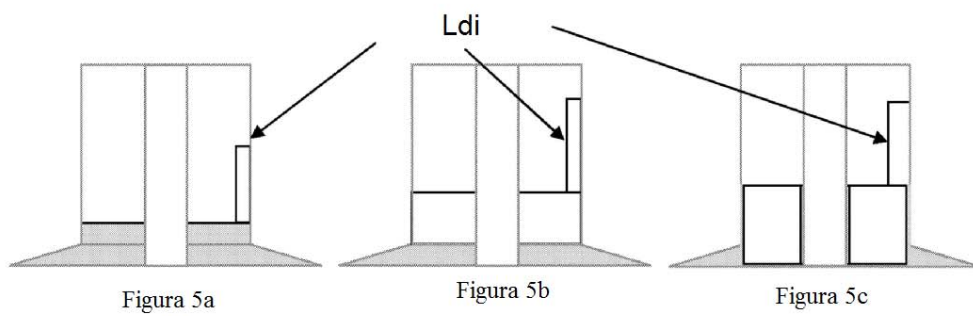


Figura 4



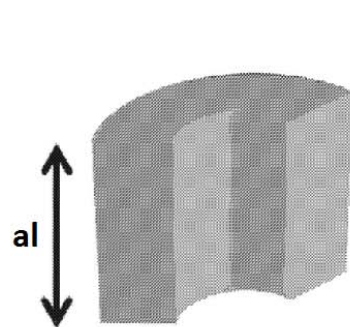


Figura 6a

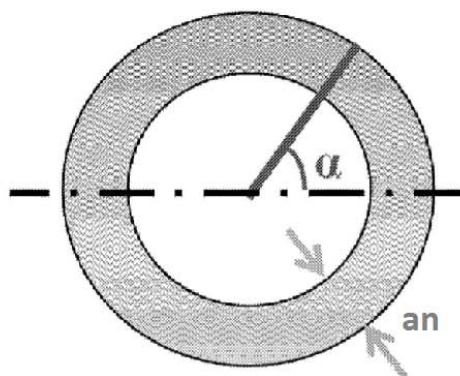


Figura 6b

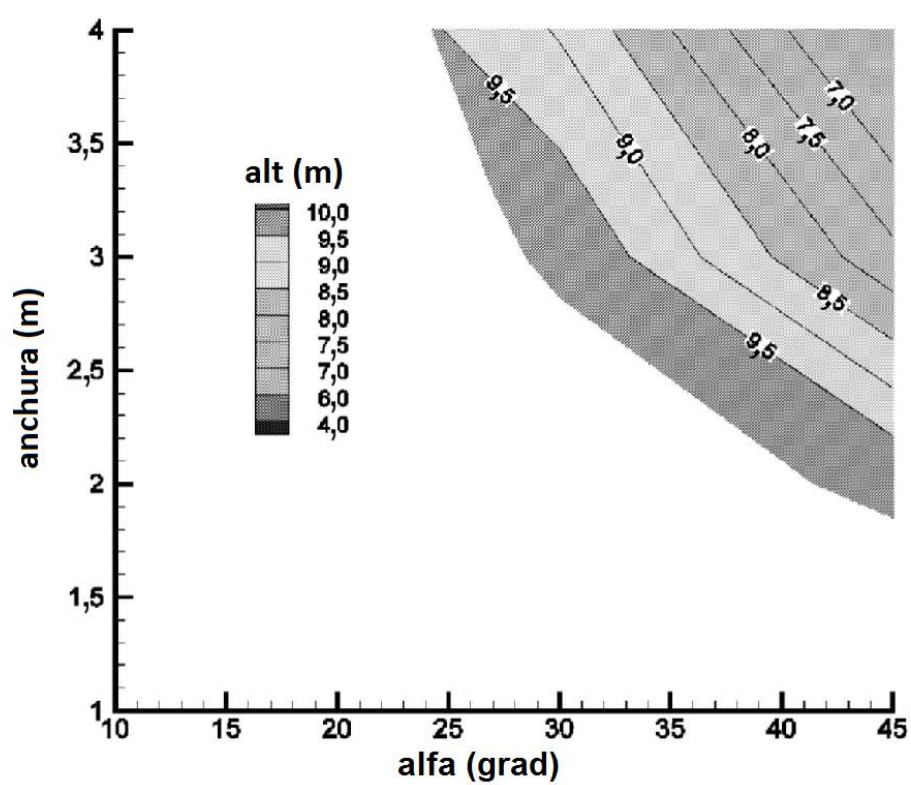


Figura 7