(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 764 023**

(21) Número de solicitud: 201831137

(51) Int. CI.:

B63B 1/28 (2006.01)
G05D 1/04 (2006.01)
G01D 1/08 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

23.11.2018

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

01.06.2020

(71) Solicitantes:

EYEFOIL S.L. (100.0%)
San Roke 61, 2º Izq
20009 SAN SEBASTIAN (Gipuzkoa) ES

(72) Inventor/es:

RODRIGUEZ RONDON, Eloy;
RAMOS CASTRO, Hugo y
ALONSO FERNANDEZ, Diego

(74) Agente/Representante:

ISERN JARA, Nuria

(54) Título: **Sistema de control para barco de vela con hidroalas**

(57) Resumen:

Un sistema de control para barco con hidroalas que comprende al menos tres sensores de presión estática y velocidad del agua sumergidos en el agua y situados en las alas sumergidas del barco, un controlador electrónico embarcado, un actuador por cada una de las alas sumergida dispuestos para cambiar el ángulo de ataque de su respectiva ala. El sistema de control permite que los barcos sobre hidroalas naveguen de forma segura y confortable con cualquier condición de ola.

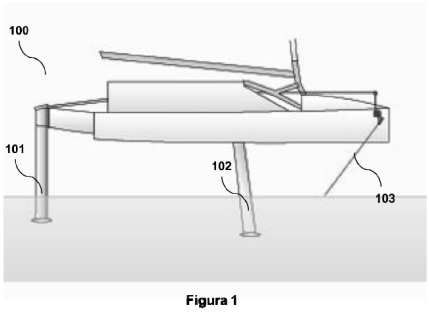

Figura 1

ES 2 764 023 A1

DESCRIPCIÓN

Sistema de control para barco de vela con hidroalas

Campo de la invención

La presente invención se engloba dentro de los tipos de barcos denominados hidroala (*hidrofoil* en inglés). Concretamente la invención se refiere a un sistema de control para barcos de vela con hidroalas.

Antecedentes de la invención

Una hidroala (o *hidrofoil* en inglés) es básicamente un ala que funciona dentro del agua. La sustentación y resistencia que proporciona un ala en cualquier fluido cumple las siguientes expresiones:

$$L = \frac{1}{2}\rho S V^2 \cdot C_L \qquad D = \frac{1}{2}\rho S V^2 \cdot C_D$$

Siendo:

- *L*. Sustentación del ala (N). Depende de la geometría y número de Reynolds.
- *D*. Resistencia del ala (N). Depende de la geometría y número de Reynolds.
- ρ. Densidad del fluido (kg/m3)
- *S*. Superficie en planta de alas (m2)
- *V*. Velocidad del fluido (m/s)
- *CL*. Coeficiente de Sustentación (adimensional). En régimen incompresible, depende del ángulo de ataque del ala, y del número de Reynolds.
- *CD*. Coeficiente de Resistencia (adimensional). En régimen incompresible, depende del ángulo de ataque del ala, y del número de Reynolds.

Al ser la densidad del agua aproximadamente 1.000 veces mayor que la del aire, dos alas con la misma geometría, desplazándose a igual velocidad, una en agua y otra en aire, genera una sustentación 1.000 veces mayor la sumergida en agua que la sumergida en aire. Es por ello, que un barco que disponga de un ala relativamente pequeña, que se mantenga bajo la superficie del agua, puede generar suficiente sustentación como para sacar el casco del agua. Al sacar el casco del agua, la resistencia del barco disminuye considerablemente y permite que el barco alcance mayores velocidades.

Las hidroalas se llevan usando en barcos desde mediados del siglo XX. La mayoría de los barcos a vela usan dos conceptos básicos para controlar la sustentación de las

hidroalas y por tanto hacer viable la navegación, se explica a continuación:

- Control por superficie sumergida.

Ajustan la sustentación de las superficies sustentadoras cambiando la superficie sumergida y por tanto sustentadora.

- Control por ángulo de ataque.

Ajustan la sustentación de las superficies sustentadoras cambiando el ángulo de ataque de las mismas, manteniéndolas siempre sumergidas por completo.

- Control Mixto.

En el control mixto se combinan los dos sistemas de ajuste de la sustentación mencionados anteriormente, de modo que la superficie y el ángulo de ataque cambian.

Como la invención propuesta parte de la base del estado del arte del control del ángulo de ataque, a continuación, se comenta con algo de detalle el funcionamiento de los barcos de vela del tipo *flying moth*.

Como se aprecia en las figuras 1 y 2, este tipo de barco (100) tiene dos superficies sustentadoras; un ala en el extremo del timón (101) y otra en la quilla (102). Cuando el barco tiene una velocidad mayor de la de “despegue”, es decir, el casco sale del agua, ambas superficies sustentan hacia arriba, y por tanto la suma de ambas sustentaciones compensa el peso del tripulante más la embarcación. Debido a que la sustentación es proporcional al cuadrado de la velocidad y al ángulo de ataque, el ángulo de ataque del ala de la quilla (102) ha de ir cambiando con la velocidad del barco, para poder siempre dar una sustentación igual al peso de embarcación más tripulante. Esto se consigue mediante un alerón que tiene el ala del timón (101). El alerón está accionado por un sistema llamado *wand* (103). El *wand* (103) es un sistema o sensor que mide la altura del casco al agua.

En el caso teórico que el barco va a una velocidad donde todas las fuerzas están compensadas, si sube la velocidad del barco, aumenta la sustentación y el barco comenzaría a salir del agua, por lo que la altura del casco sobre el agua aumentaría. Por lo tanto, cuando el barco empieza a aumentar su altura sobre el agua hay que disminuir el ángulo de ataque del ala, para evitar que las alas salgan del agua o se acerquen demasiado a la superficie libre. Esta altura la mide el *wand* (103), y consta de una varilla

con un flotador en la punta que sigue la superficie del agua. La varilla, por tanto, es una medida de la altura sobre el agua. Esa varilla está conectada al alerón del ala del timón, y va ajustando el alerón del ala, es decir, modifica su ángulo de ataque.

El wand (103), un sistema de medida mecánico, se sustituye muchas veces por sensores electrónicos acoplados a un controlador que envía órdenes a los alerones del ala.

El equilibrio de fuerzas y momentos en el resto de ejes se consigue mediante la posición del tripulante y modificando el ángulo de ataque del ángulo del timón.

Los barcos presentan dos tipos de movimientos o modos de enfrentar o atravesar las olas, uno en el que la altura del barco no cambia con respecto a la superficie media del mar, y otra en la que contornean la ola. Estos dos movimientos se ilustran en la figura 3.
El principal problema que tienen los barcos sobre hidroalas o *hydrofoils* actuales, es que no navegan bien o no pueden navegar con ola. Para ilustrar porqué es así, suponemos un barco navegando en equilibrio y mar plana navegando hacia una ola solitaria que se acerca. La primera causa se presenta porque el sensor de altura mide en una zona próxima a la vertical de su situación, por lo que la medida se toma muy cerca de la proa. Esto quiere decir que el controlador envía una señal a los alerones en el momento en que la ola empieza a pasar por debajo de la proa. Si la ola tiene una pendiente pronunciada, el tiempo de respuesta desde que el alerón se actúa hasta que la proa se eleva es insuficiente para que la ola no toque el casco. Al tocar el casco el agua el barco se desacelera y las alas dejan de sustentar el peso. La segunda causa es la dificultad de medir adecuadamente la altura sobre el mar. Un estado de la mar está compuesto por un espectro o superposición en el tiempo de distintas de olas de diferentes amplitudes y frecuencias. Debido a las ondas de más alta frecuencia y pequeña amplitud, los sensores electrónicos más precisos de los que se dispone, no son capaces de medir adecuadamente la superficie, y una vez filtrada esa señal, la medida no tiene la precisión que se requiere. Los sensores mecánicos todavía son más imprecisos.

Descripción de la invención

Es necesario ofrecer una alternativa al estado de la técnica que cubra las lagunas encontradas en la misma y, por tanto, al contrario que las soluciones existentes, esta invención propone una solución para que los barcos puedan navegar sobre hidroalas en un mayor rango de oleaje. Esto permitiría mejorar el comportamiento en la mar de este

tipo de embarcaciones y por lo tanto permitir que naveguen en condiciones de mar, viento y oleaje, en las que hoy por hoy no se puede navegar y por tanto navegar distancias más largas que a día de hoy no pueden por si el oleaje empeora lejos de puerto.

Concretamente, la invención se refiere a un sistema de control para barco con hidroalas que comprende:

- al menos tres sensores de presión estática y velocidad del agua sumergidos en el agua y situados en las alas sumergidas del barco,
- un controlador electrónico embarcado,
- un actuador por cada una de las alas sumergida dispuestos para cambiar el ángulo de ataque de su respectiva ala,

donde el controlador electrónico está dispuesto para recoger de forma periódica la información de de los sensores de presión estática y velocidad del agua y actuar en tiempo real sobre los actuadores de dichas alas sumergidas, de tal forma que, cuando hay ola, la actuación sobre las alas permite que el barco contornee la superficie del mar y cuando no existe ola o es pequeña, la actuación permite que el barco se mantenga a una altura constante sobre la superficie del mar.

Breve descripción de las figuras

Las anteriores y otras ventajas y características se entenderán más completamente a partir de la siguiente descripción detallada de realizaciones, con referencia a las siguientes figuras, que deben considerarse de una manera ilustrativa y no limitativa.

Figura 1. Muestra un esquema de una vista lateral de un barco del estado del arte del tipo *flying moth*, donde se observan las hidroalas y el sensor *wand* para el control de la elevación.

Figura 2. Muestra un esquema de una vista frontal de dicho barco del estado del arte del tipo *flying moth*, donde se observan las hidroalas y el sensor *wand* para el control de la elevación.

Figura 3. Muestra dos gráficas ejemplo de las isobaras de la presión total bajo la ola, es decir, de las líneas de corriente a diferentes profundidades de referencia.

Figura 4. Muestra unas ilustraciones con los dos modos de navegación de este tipo de embarcaciones, la altura constante y el contorneado de las olas.

Figura 5. Muestra un esquema de módulos de alto nivel de la invención, con el controlador y los sensores y actuadores que lo componen.

Figura 6. Muestra un esquema de un ejemplo de barco, de tipo *AC50,* con la situación que ocuparían los sensores de presión en la invención.

Descripción detallada de la invención

La invención mejora sustancialmente la navegación con ola de los barcos sobre hidroala. El sistema se basa en controlar el barco a partir de las medidas de varios sensores de presión (PL) y velocidad del agua (VL) situados en la parte más baja de cada apéndice; quillas y timón.

El objetivo del control es que el barco logre contornear la ola sin que el casco toque el agua. Con tal objetivo, el control actuará sobre las hidroalas del barco para mantener la presión total constante en los puntos de medida de presión y velocidad del agua. Esto se traduce, tal y como se demostrará, en mantener la profundidad de los puntos de medida respecto a la superficie del agua *h(t)*, dentro de un rango que permite al barco contornear la ola sin que toque el casco. La presión total, aplicando Bernoulli, a mantener constante en un punto de medida es:

$$P_T = P_L + \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot V_L^2 = P_o + \rho\cdot g\cdot h_o + \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot V_o^2$$

Donde:

- *PL* ≡ Presión Local medida por el sensor en el punto de medida.
- *VL* ≡ Velocidad Local medida por el sensor en el punto de medida.
- *PO* ≡ Presión Atmosférica.
- ρ ≡ Densidad del agua.
- *ho* ≡ Profundidad de referencia bajo la superficie del agua sin ola.
- *VO* ≡ Velocidad de referencia en navegación sin ola.
- *g* ≡ aceleración gravitatoria

La presión total se conserva a lo largo de las líneas de corriente. Una de las líneas de corriente es aquella tangente al perfil donde se sitúa el sensor. La presión total en cualquier punto donde se sitúe el sensor, suponiendo que el barco mantiene la velocidad respecto al agua en calma sin corriente (*Vo*) en el caso en el que se estén moviendo las alas y por tanto aportando energía al sistema será:

$$P_T \approx P_o + \rho\cdot g\cdot h(t) - \rho\cdot g\cdot\zeta(t)\left\{1 - \frac{h_w}{2}\cdot e^{\frac{2\cdot\pi}{\lambda_w}\cdot(\zeta(t)-h(t))}\right\} + \mathcal{L}\big(h(t),\alpha(t)\big) + \mathcal{M}\big(h(t),\alpha(t),\dot{\alpha}(t)\big) + \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot V_o^2$$

$$\zeta(t) = \mp\frac{h_W}{2}\cdot\sin(\beta\cdot t)$$

$$\beta = \frac{2\pi V_o}{\lambda_W} \mp \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda_W}}$$

$$c = \mp\sqrt{\frac{\lambda_W\cdot g}{2\pi}}$$

Donde:

- t ≡ Variable tiempo.
- h(t) ≡ Profundidad del punto de medida bajo la superficie del agua.
- $\zeta(t)$ ≡ Ecuación de la ola.
- hw ≡ Semiamplitud de la ola.
- λ_W ≡ Longitud de onda de la ola.
- $\mathcal{L}$ ≡ Aportación a la presión total debida a la influencia de la sustentación del hidroala.
- $\alpha(t)$ ≡ Configuración de ángulos de ataque de las hidroalas que afectan a la medida del sensor.
- $\dot{\alpha}(t)$ ≡ Derivada de la configuración de ángulos de ataque de las hidroalas que afectan a la medida del sensor.
- $\mathcal{M}$ ≡ Aportación a la presión total debida a la influencia del momento torsor que se le aplica al hidroala para cambiar su ángulo de ataque.
- $\mp$ ≡ El signo negativo (-) corresponde al caso en el que el barco avanza en sentido de la ola, y el positivo (+) cuando navega en contra de la ola.
- β ≡ Frecuencia de la ola.
- c ≡ Velocidad del tren de ola.

Por ser de un orden menor a la energía cinética del barco, se ha despreciado la aportación a la energía cinética que aporta la velocidad del agua inducida por la ola.

Identificando términos se tiene:

$$P_L = P_o + \rho\cdot g\cdot h(t) - \rho\cdot g\cdot\zeta(t)\left\{1 - \frac{h_w}{2}\cdot e^{\frac{2\cdot\pi}{\lambda_w}(\zeta(t)-h(t))}\right\} + \mathcal{L}_p\big(h(t),\alpha(t)\big) + \mathcal{M}_p\big(h(t),\alpha(t),\dot{\alpha}(t)\big)$$

$$\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot V_L^2 \approx \mathcal{L}_V\big(h(t),\alpha(t)\big)+\mathcal{M}_V\big(h(t),\alpha(t),\dot{\alpha}(t)\big)+\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot V_o^2$$

Donde:

- $\mathcal{L}_P$≡ Aportación al término de la energía potencial de la presión total debida a la influencia de la sustentación del hidroala.
- $\mathcal{L}_V$≡ Aportación al término de la energía cinética de la presión total debida a la influencia de la sustentación del hidroala.
- $\mathcal{M}_P$≡ Aportación al término de energía potencial de la presión total debida a la influencia del momento torsor que se le aplica al hidroala para cambiar su ángulo de ataque.
- $\mathcal{M}_V$≡ Aportación al término de energía potencial de la presión total debida a la influencia del momento torsor que se le aplica al hidroala para cambiar su ángulo de ataque.

Por tanto, si se mantiene constante la presión total, el sensor de presión seguirá la trayectoria de una línea de corriente de Presion Total constante. Las diferentes líneas de corriente del fluido, las determina la condición de referencia:

$$P_T = P_o + \rho\cdot g\cdot h_o + \frac{1}{2}\cdot\rho\cdot V_o^2$$

La ecuación anterior indica que para una velocidad del barco constante *Vo*, si se sube la presión total de referencia, el sensor seguirá una línea de corriente más profunda y si se baja la presión total de referencia será menos profunda.

La figura 3 muestra las líneas de corriente para diferentes presiones totales para diferentes profundidades *ho* de referencia: 1, 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8 metros. Debido a la exponencial en la expresión del diferencial de presión, se observa que a medida que la profundidad de referencia crece, las líneas de corriente o trayectorias del sensor se hacen más planas.

A la vista de la figura 3 se puede concluir que un sistema de control que tenga como objetivo que la presión total de un punto del ala se mantenga constante, obligará a que la trayectoria de esa ala sea una línea de corriente y por tanto contornee la ola. Para poder implementar este sistema los sensores de presión y velocidad deberán situarse en las alas sumergidas, tal y como se presenta en la figura 6. Si estos sensores están en todas las alas, el casco, al estar sólidamente unido a las alas seguirá la trayectoria de las isobaras de las alas, por tanto, con la configuración adecuada del controlador, el barco podrá seguir una trayectoria que contornee la ola. En el caso de que no haya ola el barco se mantendrá a altura constante ya que la profundidad será igual a la de referencia *ho*

En la figura 4 se muestra una ola sinusoidal cuando las olas del mar son un espectro de ola. Sin embargo, las líneas de corriente seguirán trayectorias parecidas a las de la figura 3, por lo que el barco con ola del mar, también contorneará la ola.

La ecuación correspondiente a la presión total de un espectro de olas tiene la misma forma que la ecuación ya detallada. Por tanto, con varias medidas secuenciales de presiones y velocidades se puede caracterizar las amplitudes mayores del espectro de ola. Esto quiere decir que mientras se navega con ola, el sistema de control puede ir calculando en todo momento cuál es el tren de olas que se va a encontrar.

Teniendo el espectro de ola en el que está navegando el barco, el controlador se puede ajustar de modo que la variación de los ángulos de ataque de las alas con el tiempo, permita a las fuerzas hidrodinámicas responder con tiempo para subir y bajar la proa / popa contorneando la ola y que el casco del barco no toque el agua.

El sistema de control necesario para implantar esta metodología de control requiere de al menos tres sensores situados en las alas que estén sumergidas, un procesador embarcado en el que corre en tiempo real el algoritmo de control y los actuadores. La figura 5 muestra un esquema de muy alto nivel de la ubicación de los sensores de presión de la invención en un barco tipo

REIVINDICACIONES

1. Sistema de control para barco con hidroalas caracterizado porque comprende:

- al menos tres sensores de presión estática y velocidad del agua sumergidos en el agua y situados en las alas sumergidas del barco,
- un controlador electrónico embarcado,
- un actuador por cada una de las alas sumergida dispuestos para cambiar el ángulo de ataque de su respectiva ala,

donde el controlador electrónico está dispuesto para recoger de forma periódica la información de los sensores de presión estática y velocidad del agua y actuar en tiempo real sobre los actuadores de dichas alas sumergidas, de tal forma que, cuando hay ola, la actuación sobre las alas permite que el barco contornee la superficie del mar y cuando no existe ola o es pequeña, la actuación permite que el barco se mantenga a una altura constante sobre la superficie del mar.

2. Sistema de control para barco con hidroalas según la reivindicación 1caracterizado porque dichas alas sumergidas del barco son las quillas y/o timón del barco.

3. Sistema de control para barco con hidroalas según la reivindicación 1caracterizado porque el controlador actúa sobre los actuadores de dichas alas sumergidas de tal forma que se mantenga la presión total de los sensores de presión estática y velocidad siguiendo la siguiente fórmula:

$$P_T = P_o + \rho \cdot g \cdot h_o + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_o^2$$

donde:

- P_T ≡ Presión total medida del sensor
- P_O ≡ presión atmosférica
- ρ ≡ densidad del agua
- *ho* ≡ profundidad de referencia bajo la superficie del agua sin ola a la cual está ubicado el sensor en el ala.
- *g* ≡ aceleración gravitatoria
- V_O ≡ velocidad de referencia en navegación sin ola.

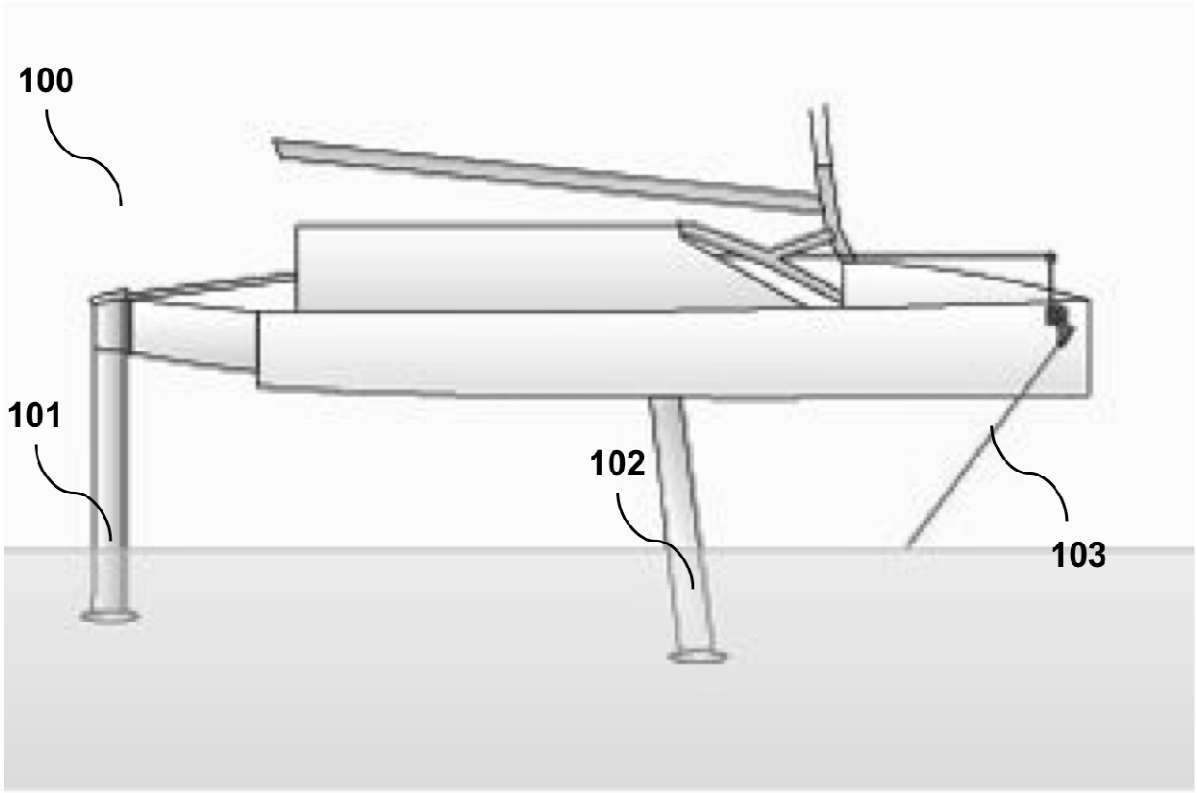

Figura 1

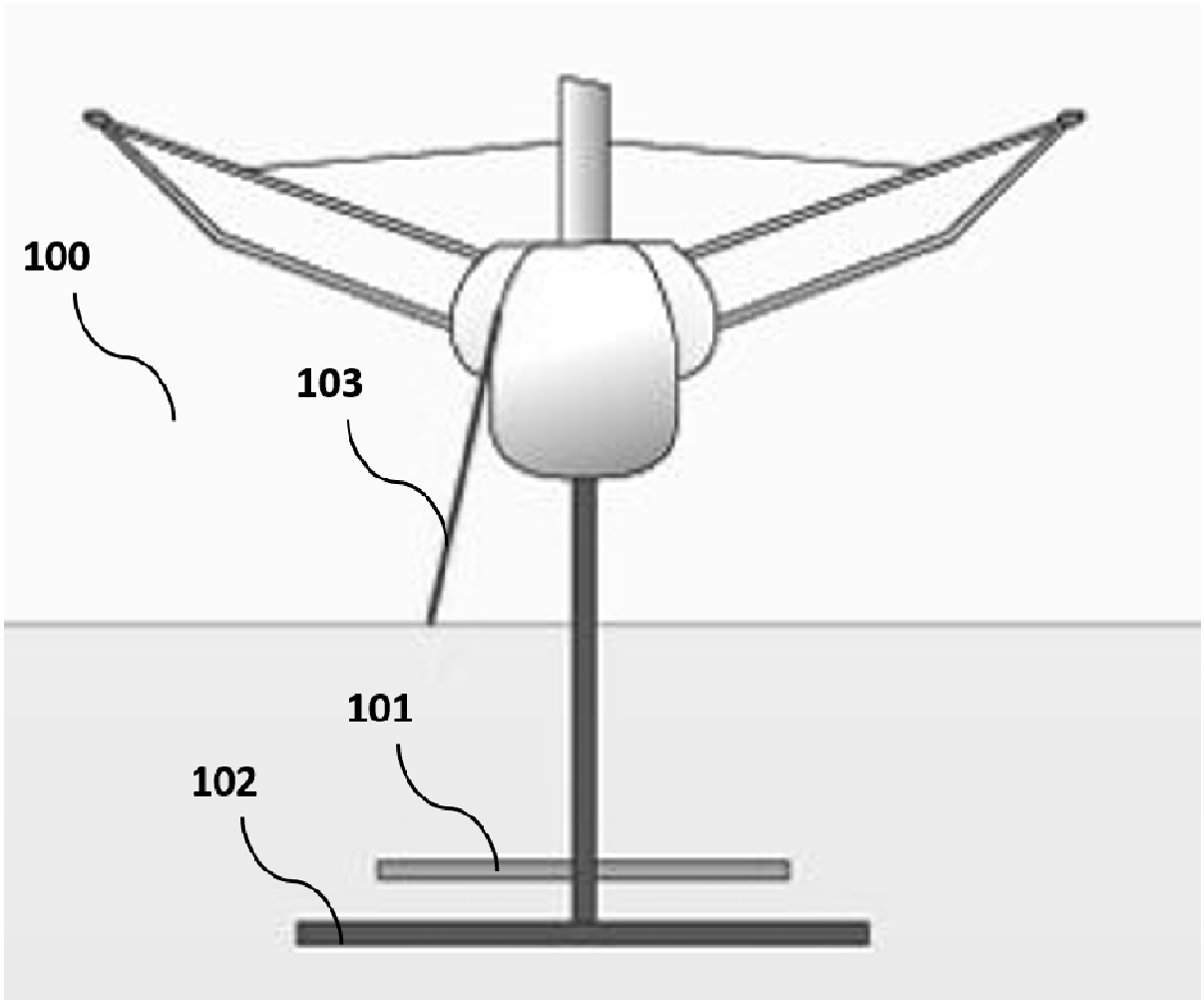

Figura 2

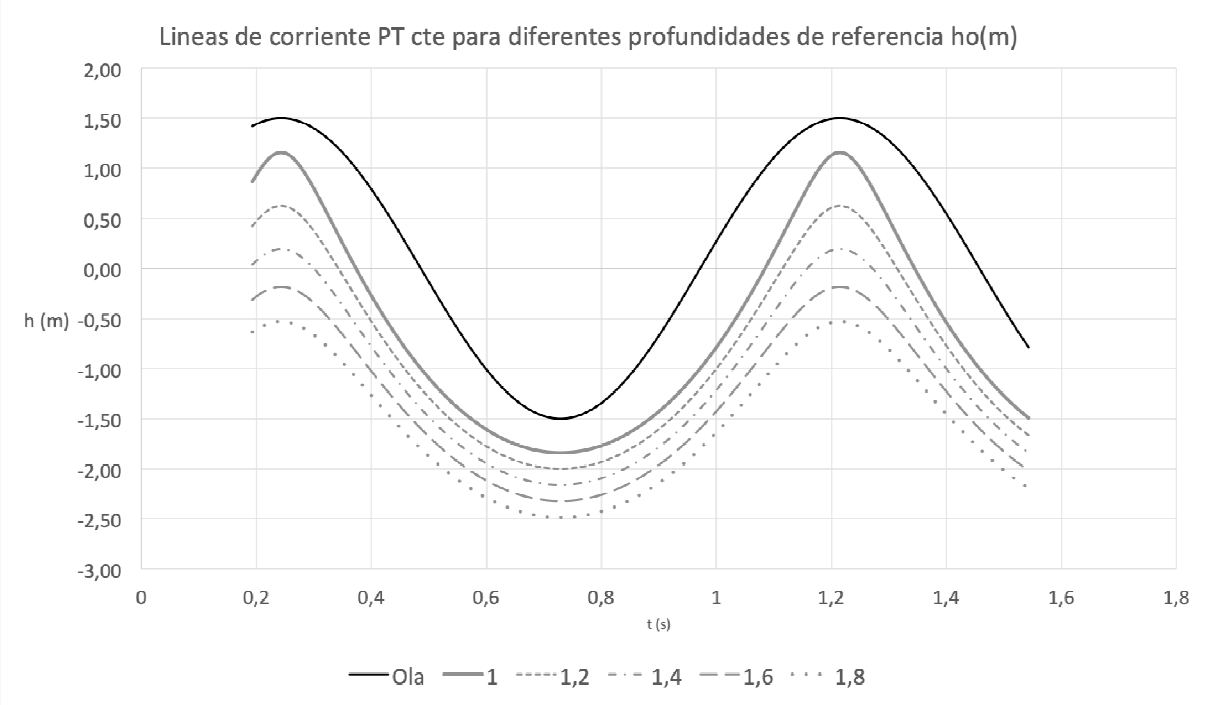
Lineas de corriente PT cte para diferentes profundidades de referencia ho(m)
2,00
1,50
1,00
0,50
0,00
h (m) -0,50
-1,00
-1,50
-2,00
-2,50
-3,00
0
0,2
0,4
0,6
0,8
1
1,2
1,4
1,6
1,8
t (s)
Ola
1
1,2
1,4
1,6
1,8

Figura 3

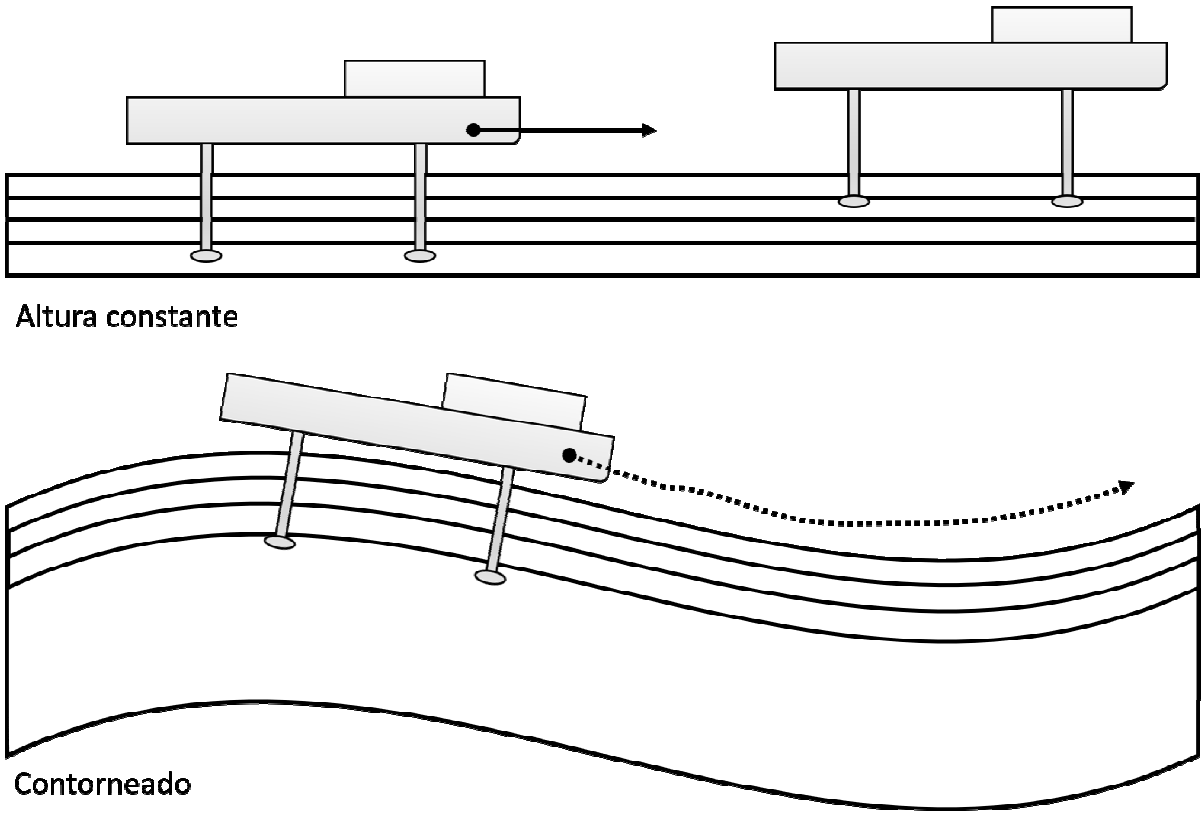

Figura 4

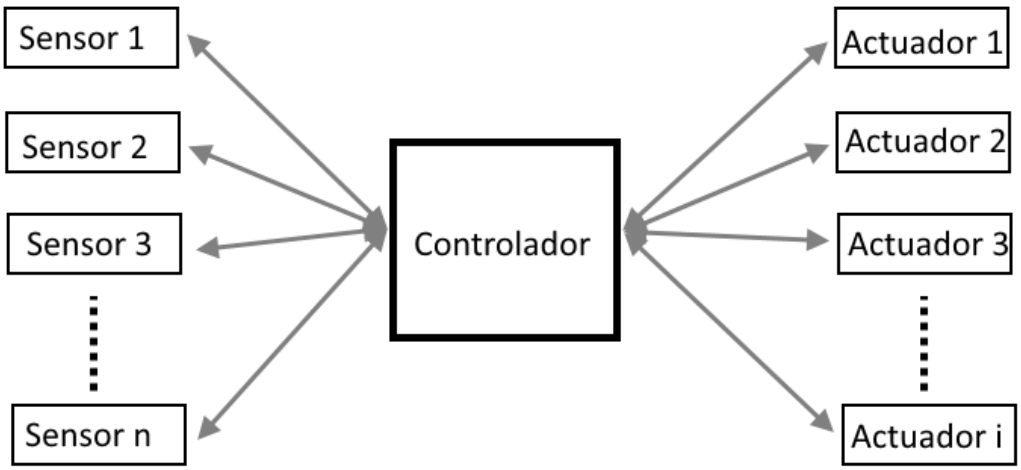

Figura 5

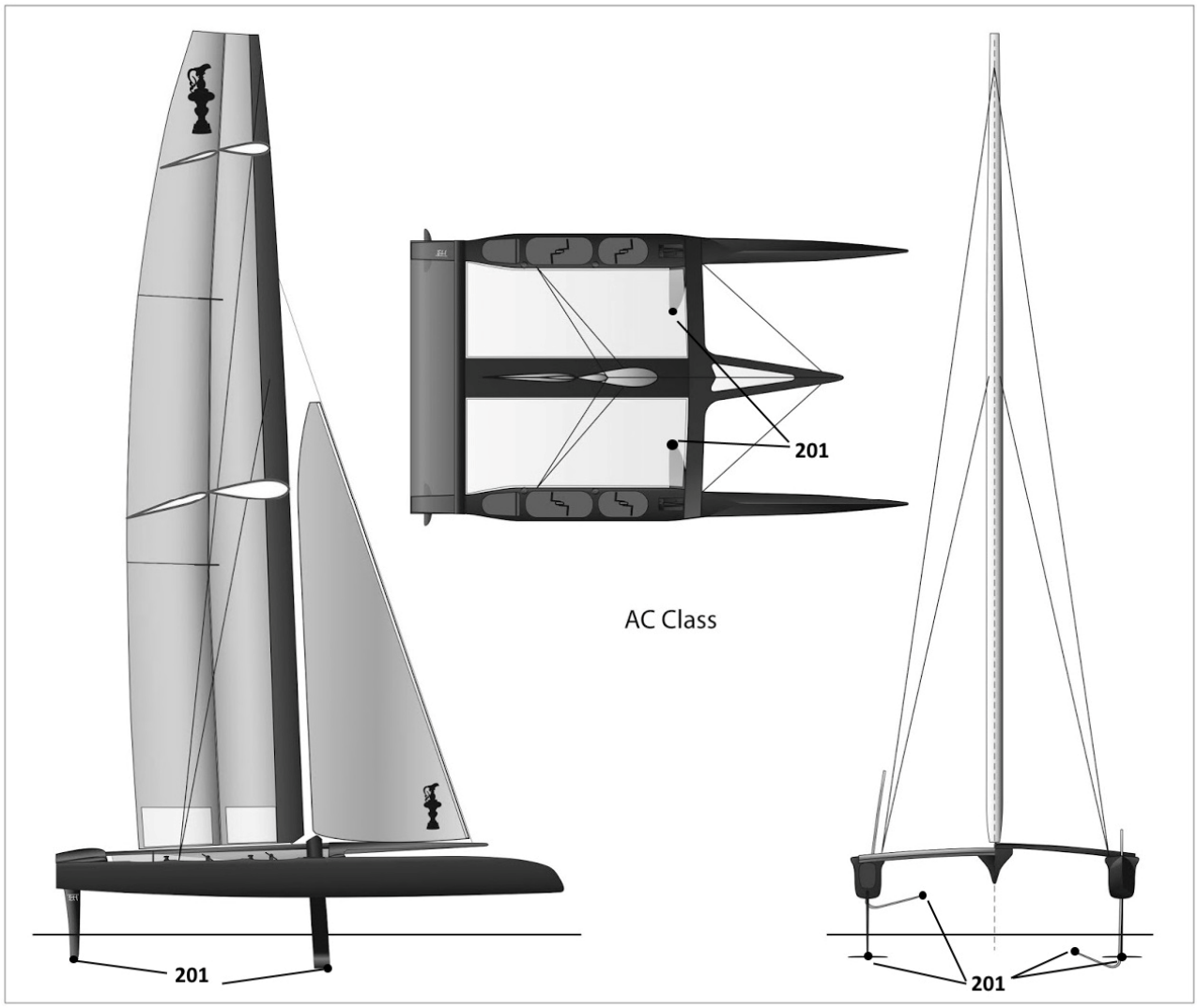

Figura 6

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 201831137

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 23.11.2018

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) **Int. Cl. :** Ver Hoja Adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) **Documentos citados**	**Reivindicaciones afectadas**
X	US 3364892 A (ERIK PERSSON et al.) 23/01/1968, Columna 1, líneas 24-55; columna 2, líneas 12-45; columna 4, líneas 69-75; figuras.	1-2
A	WO 2015187102 A1 (RCJ D O O) 10/12/2015, Párrafos [12 - 13]; figuras.	1
A	GB 2527055 A (THALES HOLDINGS UK PLC) 16/12/2015, resumen; figuras.	1
A	US 3175526 A (JOHNSON JR JOHN M et al.) 30/03/1965, figuras.	1

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	**Examinador**	**Página**
27.03.2019	D. Herrera Alados	1/2

CLASIFICACIÓN OBJETO DE LA SOLICITUD

B63B1/28 (2006.01)
G05D1/04 (2006.01)
G01D1/08 (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

B63B, G05D, G01D

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC