

Guía de la IALA n.º 1099

sobre

el Diseño Hidrostático de Boyas

Edición 1

Mayo de 2013



10, rue des Gaudines
78100 Saint Germain en Laye, Francia
Teléfono: +33 1 34 51 70 01 Fax: +33 1 34 51 82 05
Correo electrónico: contact@iala-aism.org Internet: www.iala-aism.org

Revisiones del Documento

Las revisiones realizadas al documento de la IALA se anotarán en el siguiente cuadro antes de la difusión de un documento revisado.

Fecha	Página / Apartado revisado	Motivo de la revisión

La revisión de la traducción de este documento ha sido realizada por el grupo de trabajo de Puertos del Estado en el que han participado:

*Luis Martínez (Autoridad Portuaria de Vigo);
Enrique Abati (Autoridad Portuaria de Marín);
Juan Manuel Vidal (Autoridad Portuaria de Gijón);
Carlos Calvo (Autoridad Portuaria de Santander);
Cristina García-Capelo (Autoridad Portuaria de Bilbao);
José Luis Núñez (Autoridad Portuaria de Pasajes);
Juan Antonio Torres (Autoridad Portuaria de Huelva);*

*Septimio Andrés (Autoridad Portuaria de Sevilla);
Germán Gamarro (Autoridad Portuaria de Algeciras);
Santiago Tortosa (Autoridad Portuaria de Ceuta);
Jaime Arenas (Autoridad Portuaria de Baleares);
Antonio Cebrián y Guillermo Segador (Autoridad Portuaria de Barcelona);
José Carlos Díez (Puertos del Estado).*

Coordinación de la edición en español y edición final:

José Carlos Díez (Puertos del Estado)

NOTA: Puertos del Estado no se responsabiliza de los errores de interpretación que puedan producirse por terceros en el uso del contenido de este documento, que corresponde a una traducción del documento original de la Asociación Internacional de Ayudas a la Navegación Marítima y Autoridades de Faros (IALA) denominado según aparece en la carátula.

Índice de contenidos

Revisiones del Documento	1
Índice de contenidos	3
Índice de tablas	4
Índice de figuras	5
1 Objeto	6
2 Ámbito de aplicación	6
3 Introducción	6
4 Flotabilidad	7
5 Estabilidad	8
6 Definición – Unidades – Notación	8
6.1 Movimiento de una boya	8
6.2 Volumen	9
6.3 Línea de flotación	9
6.4 Diámetro de la línea de flotación	9
6.5 Área del plano de agua	9
6.6 Inercia del plano de agua	9
6.7 Peso	9
6.8 Flotabilidad	9
6.9 Desplazamiento	9
6.10 Reserva de flotabilidad	10
6.11 Centro de flotabilidad	10
6.12 Fuerza de flotación	10
6.13 Densidad del agua	10
• La temperatura	10
• La salinidad	10
• Océano Atlántico Norte $1.025 \text{ kg} / \text{m}^3$.	10
• Mar Mediterráneo $1.028 \text{ kg} / \text{m}^3$.	10
• Aguas de estuario de $1.000 \text{ kg} / \text{m}^3$ a $1.015 \text{ kg} / \text{m}^3$.	10
6.14 Centro de gravedad	10
7 Cálculos	10
7.1 Centro de gravedad	11
7.2 Centro de flotabilidad	11
7.3 Estabilidad	12
7.4 Altura metacéntrica	12

•	Aumentar el peso del lastre y/o colocarlo en un lugar más bajo;	13
•	Reducir el peso de la superestructura y los equipos, o colocarlos en un lugar más bajo.	13
7.5	Presupuesto de masa y posición del centro de gravedad (G)	13
7.6	Volumen desplazado	13
7.7	Comprobación de la flotabilidad	14
7.8	Posición del centro de flotabilidad	14
7.9	Brazo adrizante	14
7.10	Ángulo de escora	15
8	Mediciones prácticas	17
8.1	Centro de gravedad	17
8.2	Periodo de balanceo	17
8.3	Línea de flotación	18
8.4	Altura metacéntrica	19
8.5	Pruebas de remolque	20
9	Estabilidad con ángulos de escora reducidos	20
9.1	Estabilidad de masa y de forma	21
10	Introducción a la estabilidad dinámica	21
11	Estudio de curvas de estabilidad (curvas de brazo adrizante)	21
12	Comprobación de seguridad de la estabilidad	22
13	Referencias	23
ANEXO A	Determinación del centro de gravedad G de los componentes de una boya	24
ANEXO B	Determinación del centro de gravedad G de una boya	26
ANEXO C	Ejemplos de los periodos de balanceo de diferentes tipos de boya	27

Índice de tablas

Tabla 1	Ejemplos de las alturas metacéntricas de boyas sintéticas empleadas por diversas administraciones	13
---------	---	----

Índice de figuras

Figura 1	Tipos de boya: de (izquierda a derecha: de faldón, de cola tubular larga, de cola tubular corta, LANBY, de espeque con lastre, de cola tubular con un solo punto de amarre)	6
Figura 2	Boya de espeque, baliza articulada	7
Figura 3	Descripción del movimiento de una boya (de Guía 1065 de la IALA)	8
Figura 4	Centro de flotabilidad	10
Figura 5	Centro de gravedad de una boya	11
Figura 6	Altura metacéntrica	12
Figura 7	Altura metacéntrica	14
Figura 8	Ángulo de escora	15
Figura 9	Áreas de las fuerzas del viento y del agua	16
Figura 10	Una boya izada desde un punto de izado fuera de su eje central	17
Figura 11	Medición de la altura metacéntrica	19
Figura 12	Pruebas de remolque	20
Figura 13	Curva GZ	22
Figura 14	Boya en posición horizontal	23

1 OBJETO

El objeto de esta guía es ofrecer información sobre el cálculo de la estabilidad de los nuevos diseños de boyas, así como establecer el impacto de la instalación de nuevos equipos sobre las boyas existentes. Asimismo, se explican los métodos de medición de estos parámetros en las boyas existentes.

2 ÁMBITO DE APLICACIÓN

Esta guía ofrece información sobre aquellos aspectos del diseño de boyas que afectan a la flotabilidad y la estabilidad de la boya. Cuando se consideran las cargas debidas a los efectos del viento y la marea, debe consultarse la Guía 1066 sobre el Diseño de ayudas flotantes a la navegación [1]. Si el lector no está familiarizado con los cálculos básicos de la estabilidad de buques, se recomienda que consulte un libro de texto sobre ingeniería naval.

Los aspectos del diseño de boyas tratados en esta guía aportan la base para el diseño de una boya desde los fundamentos básicos, pero también pueden emplearse cuando se contempla el montaje de diferentes superestructuras o nuevos equipos en boyas ya existentes o en las que estén en funcionamiento en distintos entornos de fondeo.

3 INTRODUCCIÓN

Esta guía da información sobre el funcionamiento hidrostático de boyas convencionales (de faldón, de cola tubular y de espeque con lastre) fondeadas con amarres convencionales (tal y como se describen en la Guía 1066 [1]). En la Figura 1, se pueden ver algunos tipos de boya.

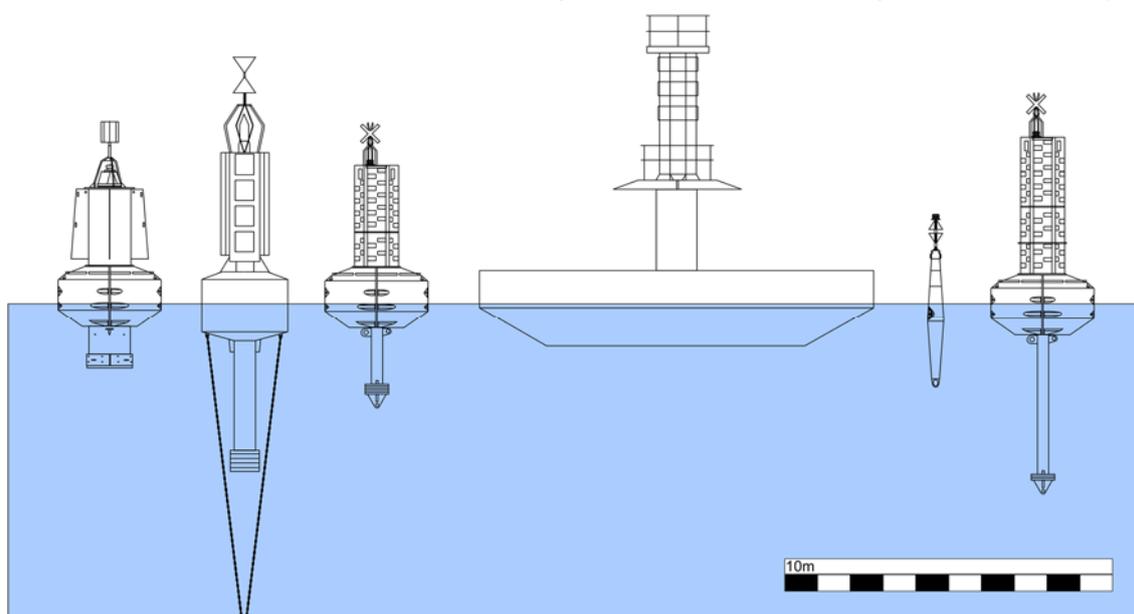


Figura 1 Tipos de boya: (de izquierda a derecha) de faldón, de cola tubular larga, de cola tubular corta, LANBY, de espeque con lastre, de cola tubular con un solo punto de amarre

Las ilustraciones utilizadas en la presente guía son las de una boya de cola tubular empleada por el servicio francés. Sin embargo, los principios y procesos descritos en ella son aplicables a todas las boyas que estén a flote libremente y dotadas de lastre externo o interno.

La estabilidad de las balizas articuladas y las boyas de espeque depende de que el tren de fondeos aporte suficiente fuerza vertical para mantener la boya en posición vertical, y no se incluyen los detalles de dichos cálculos. No obstante, para estos tipos de boya, es relevante la información que se aporta sobre el desplazamiento y el centro de flotabilidad.

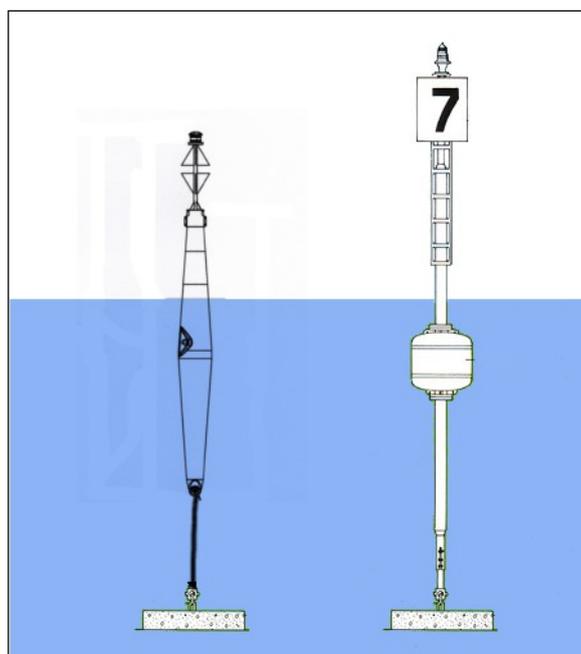


Figura 2 Boya de espeque, baliza articulada

El tamaño de la boya y, por tanto, el de la marca diurna dependerán del alcance diurno que se exige a la boya para que esta sea visible. Por su parte, la altura de la marca diurna o torre dependerá de la altura necesaria del plano focal de la luz o del sistema de antenas (véanse al respecto la NAVGUIDE [2] y la Guía sobre Marcas diurnas para ayudas a la navegación [3]).

4 FLOTABILIDAD

La flotabilidad es la fuerza vertical que proporciona la parte sumergida de la boya, que desplaza cierto volumen de agua.

Es vital que la boya retenga la suficiente reserva de flotabilidad para todas las condiciones meteorológicas y que la ayuda a la navegación siga siendo eficaz en la mayoría de ellas. Debe haber suficiente flotabilidad para soportar todo el peso de la boya y el amarre. Si se prevé que el personal de mantenimiento trabaje sobre la boya a flote, debe tener una reserva de flotabilidad y estabilidad suficientes para que dicho trabajo se realice con seguridad. El tamaño y, por consiguiente, el peso de la boya dependerán de los requisitos de navegación y de las condiciones ambientales locales.

En el caso de las boyas con varios compartimentos estancos, una autoridad puede exigir que las boyas se mantengan a flote con una o más secciones del flotador dañadas, que ya no aportan flotabilidad. En tal caso, los cálculos de flotación deben realizarse con el número reducido de compartimentos flotantes.

Cuando hay fuerzas del viento y/o del flujo de marea actuando sobre la boya, aumentarán las cargas sobre el amarre y se necesitará más flotabilidad para soportar dichas cargas adicionales del amarre (véase la referencia [1]).

Si se prevén bajas temperaturas, en los cálculos deben incluirse estimaciones del peso del hielo sobre la cubierta y la superestructura. Las fuerzas del hielo, producidas por la congelación del agua en torno a la boya, no se han tenido en cuenta en los cálculos que van a exponerse.

El oleaje ejercerá algún efecto sobre las cargas del amarre y, por lo tanto, sobre las necesidades de flotabilidad. Dichos efectos son extremadamente complejos. Sin embargo, si las olas no están rompiendo, la boya acompañará la superficie del agua y se producirá un incremento de las necesidades de flotabilidad para contrarrestar el desplazamiento por el oleaje.

5 ESTABILIDAD

La estabilidad mide la capacidad de la boya para permanecer en posición vertical, a fin de que la ayuda a la navegación siga siendo eficaz en la mayoría de las condiciones de funcionamiento. Existen dos aspectos de la estabilidad que se incorporarán al diseño de boyas, que son la estabilidad de forma y la estabilidad de peso.

La estabilidad de forma es la estabilidad aportada por la forma de la parte sumergida de la boya. En una boya cilíndrica corriente, cuanto mayor sea el diámetro de la boya, más estable será. Un ejemplo extremo de tal caso son las boyas LANBY (boyas de navegación de gran tamaño), que tienen un cuerpo poco profundo, parecido a un plato, con un diámetro de 13 metros. Debido a su gran diámetro, dicho cuerpo aporta considerable estabilidad en la mayoría de las situaciones. Sin embargo, en condiciones extremas, incluso una boya de grandes dimensiones puede volcar y, entonces, quedará estable en posición invertida.

El centro de gravedad de la boya debe estar en una posición tal que tienda a enderezarla y, así, aportar estabilidad debido al peso. La boya de cola tubular larga es un ejemplo de este tipo. El lastre colocado en la base de la cola tubular ejerce fuerzas que la enderezan, o adrizan.

Los cálculos de estabilidad estática evalúan los efectos combinados de la estabilidad de forma y la estabilidad de peso.

6 DEFINICIÓN – UNIDADES – NOTACIÓN

Todas las unidades se muestran de acuerdo con el sistema SI.

6.1 Movimiento de una boya

En la Figura 3 a continuación, se muestran los diversos movimientos de una boya y las definiciones empleadas en la ingeniería naval son las que siguen. El eje longitudinal de un buque correspondería a la dirección del flujo de agua que pasa por la boya.

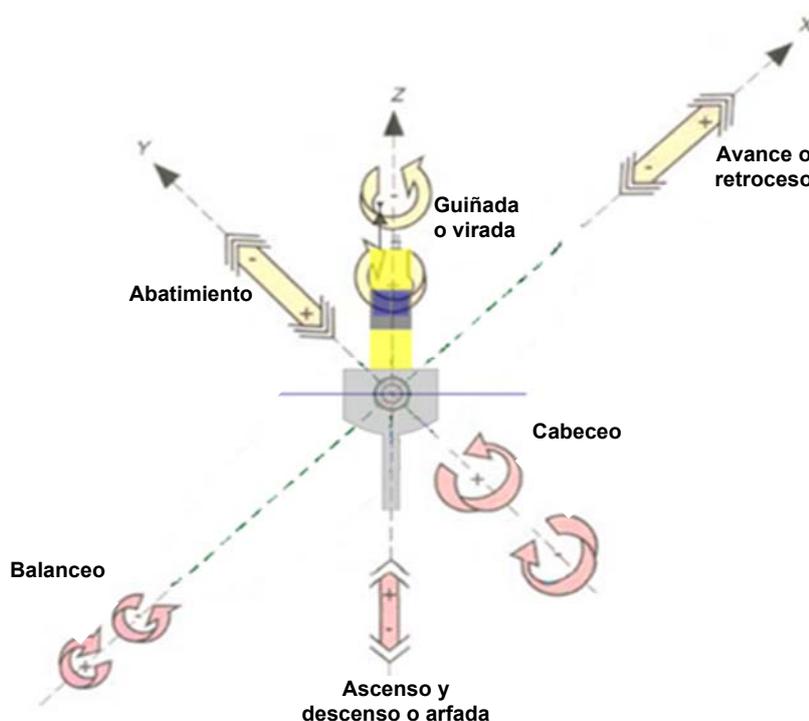


Figura 3 Descripción del movimiento de una boya (según la Guía 1065 de la IALA)

6.2 Volumen

El cuerpo de la boya es un volumen cerrado que aporta flotabilidad a la boya cuando está en el agua. El volumen total se define como V (m^3).

6.3 Línea de flotación

La línea de flotación, WL_i , es la línea horizontal entre la parte sumergida de la boya y su parte emergente.

6.4 Diámetro de la línea de flotación

El diámetro de la línea de flotación D (m) es el diámetro de la boya medido en la línea de flotación.

6.5 Área del plano de agua

Cuando la boya se encuentra en posición vertical, el plano de agua es normalmente circular. El área del plano de agua WP (m^2) es la zona de la sección del flotador formada por la línea de flotación.

Nota:

Hay que restar del área del plano de agua el de cualquier tubo que pase a través del flotador y que esté abierto al agua.

6.6 Inercia del plano de agua

La inercia del plano de agua I_f (m^4) es el momento de inercia del plano de agua alrededor del eje del centro del plano de agua O . Caracteriza la energía necesaria para girar la superficie alrededor de un eje, a medida que la boya se desplaza de la vertical.

p. ej. $I_f = \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot D^4$ para superficies circulares.

6.7 Peso

El peso W es la fuerza vertical (N) de la gravedad hacia abajo, ejercida sobre la boya. Es la suma de la masa de todos los componentes individuales multiplicada por la aceleración de la gravedad g .

$$W = m_b \cdot g = \sum_i m_i \cdot g$$

m_b masa de la boya, en kg
 m_i masa de cada componente, en kg
 g aceleración de la gravedad, en m/s^2

6.8 Flotabilidad

La flotabilidad V_B (m^3) es el volumen de la parte sumergida de la boya, limitada por la línea de flotación. La flotabilidad incluye el cuerpo (flotador) y otros componentes sumergidos, tales como el faldón, las asas de amarre, la cola tubular, el lastre externo, etc.

6.9 Desplazamiento

El desplazamiento Δ (kg) es el volumen total desplazado (V_B) por la boya multiplicado por la densidad del agua.

$$\Delta = V_B \cdot \rho$$

ρ densidad del agua, en kg/m^3 (véanse los valores en el apartado 6.13)

6.10 Reserva de flotabilidad

La reserva de flotabilidad R (m^3) es el volumen encerrado de la boya que se encuentra por encima de la línea de flotación y se suele expresar como un porcentaje del volumen total.

$$V = R + V_B$$

6.11 Centro de flotabilidad

El centro de flotabilidad B es el centroide del volumen de agua desplazado. Es el punto de aplicación de las fuerzas de flotación. La posición del centroide varía en función de las cargas, el balanceo, el calado y otros movimientos de la boya.

6.12 Fuerza de flotación

La fuerza de flotación F_B (N) es la fuerza vertical ejercida sobre la parte sumergida de la boya, debido al desplazamiento de agua.

Definición

Un cuerpo sumergido en un fluido se ve sometido a una fuerza vertical F_B dirigida hacia arriba (y en dirección contraria al peso del fluido desplazado), que es igual al desplazamiento Δ del cuerpo flotante (véase el apartado 6.9).

$$F_B = V_B \cdot \rho \cdot g$$

6.13 Densidad del agua

La densidad del agua ρ depende principalmente de:

- La temperatura
- La salinidad

Habitualmente, se toman los valores medios de la densidad de agua del mar ρ :

- Océano Atlántico Norte 1.025 kg / m^3
- Mar Mediterráneo 1.028 kg / m^3
- Aguas de estuario de 1.000 kg / m^3 a 1.015 kg / m^3

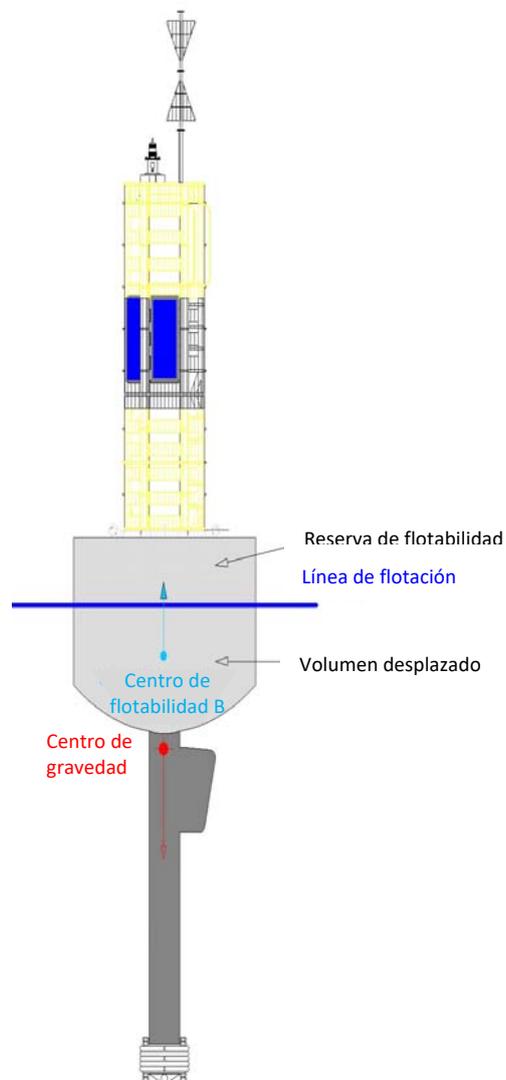


Figura 4 Centro de flotabilidad

6.14 Centro de gravedad

El centro de gravedad G es el punto de aplicación del peso total W .

7 CÁLCULOS

El punto de partida para los cálculos será un dibujo detallado de la boya, junto con los detalles de todos los equipos que se montarán en ella. El resultado del peso de la boya será la suma de todos estos componentes. La masa de los elementos de acero, las piezas de aluminio, las molduras de plástico, etc. se pueden calcular, pero se recomienda que se realicen comprobaciones, pesando los componentes, cuando sea factible.

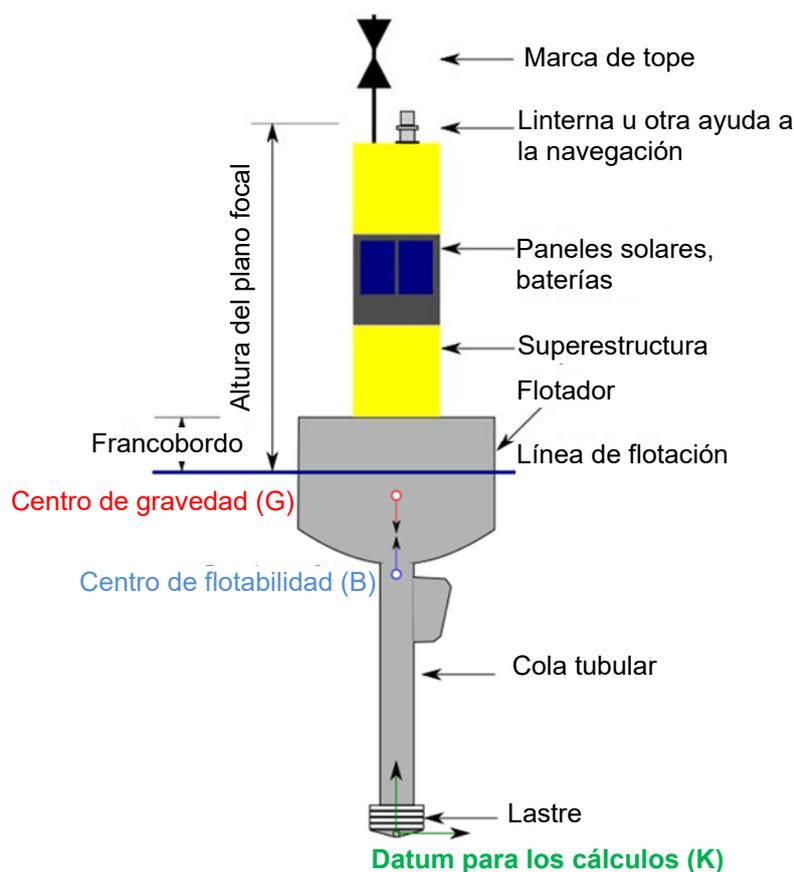


Figura 5 Centro de gravedad de una boya

7.1 Centro de gravedad

El centro de la masa, que se suele denominar el centro de gravedad (G), se puede establecer sumando los momentos de cada componente alrededor de un origen (K) elegido. Como las boyas suelen ser simétricas alrededor de su eje vertical, sólo es necesario tomar los momentos a lo largo del eje vertical (X). La línea de base de la quilla o del faldón de la boya se suele tomar como el origen y, por tanto, los momentos siempre serán positivos. Se divide la suma de los momentos por la masa total y el resultado es la distancia vertical del centro de gravedad por encima del origen. Se suele incluir toda esta información en el conjunto del peso (hay un ejemplo en el ANEXO A).

7.2 Centro de flotabilidad

El centro de flotabilidad B es el centroide (centro geométrico) del volumen sumergido de la boya. Cabe resaltar que varía en función de la profundidad de inmersión de la boya y del ángulo de escora.

Para calcular la posición del centro de flotabilidad, los momentos de los volúmenes de todos los componentes sumergidos alrededor del origen (el mismo utilizado para calcular el centro de gravedad) se pueden sumar y se calcula el centro de flotabilidad (véase el ejemplo en el ANEXO B).

7.3 Estabilidad

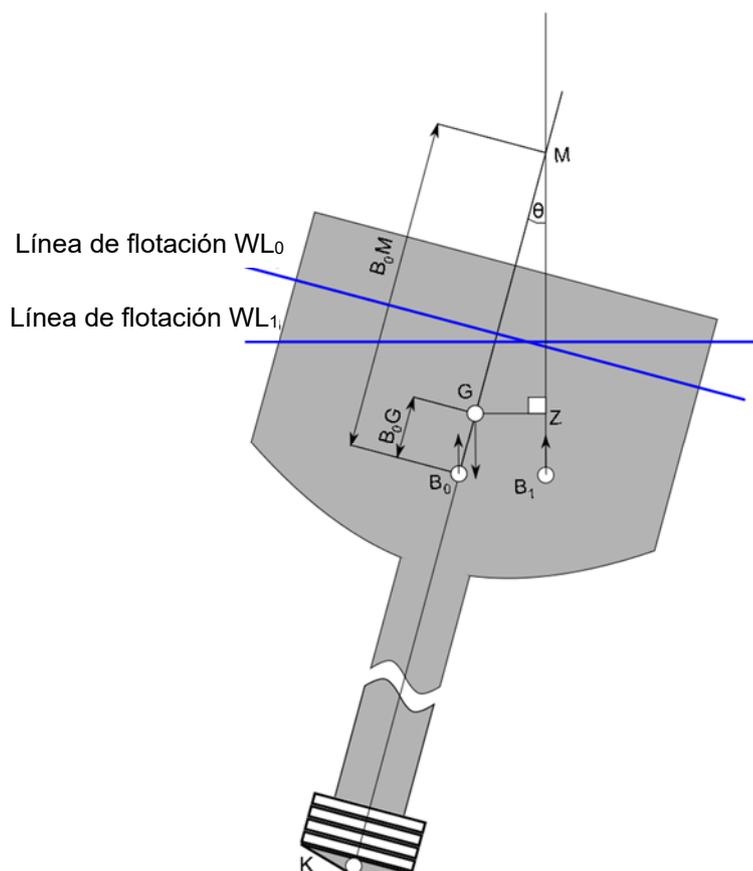


Figura 6 Altura metacéntrica

WL ₀	línea de flotación inicial
WL ₁	línea de flotación escorada
G	centro de gravedad
B ₀	centro de flotabilidad inicial
B ₁	centro de flotabilidad escorado
M	metacentro
GM	altura metacéntrica
BM	radio metacéntrico

Una vez establecidos la masa total (m), el centro de flotabilidad (B) y el centro de gravedad (G), puede calcularse la altura metacéntrica (GM). La altura metacéntrica aporta una medición del momento adrizante del centro de masa de la boya relativo al centro de flotabilidad.

Para el cálculo de estabilidad, se suele considerar la boya como un cuerpo que flota libremente, es decir, sin los amarres, lo que suele representar el peor caso de estabilidad. En lo que se refiere a las boyas pequeñas, el amarre puede ser fundamental para la estabilidad, y su peso se tendrá que incluir en los cálculos de estabilidad. El peso del amarre varía en función del nivel del agua y las variaciones del oleaje.

7.4 Altura metacéntrica

GM (véase la Figura 6) es la altura metacéntrica y BM es el radio metacéntrico. En caso de ángulos reducidos de escora, el radio metacéntrico define el movimiento del centro de flotabilidad (B) alrededor del metacentro (M). Cuando el ángulo de escora es reducido, M es el punto de intersección de la línea B_0G y la línea vertical que pasa a través de B_1 .

Si la altura metacéntrica (GM) es positiva, si la boya está escorada, ésta volverá a su posición vertical. Por el contrario, si es negativa, cualquier desplazamiento de la boya dará lugar, en la mayoría de los casos, a que se escore aún más y tenderá a volcarse.

Para aumentar la altura metacéntrica, o bien hay que aumentar el diámetro del cuerpo o, más a menudo, hay que bajar el centro de gravedad (G), lo que se puede conseguir al:

- Aumentar el peso del lastre y/o colocarlo en un lugar más bajo;
- Reducir el peso de la superestructura y los equipos, o colocarlos en un lugar más bajo.

Es difícil definir el valor idóneo de la altura metacéntrica. Se ha establecido una orientación del 10% del diámetro del cuerpo para las boyas normales de acero (diámetro de 3 metros), pero se piensa que esta cifra es algo reducida para las boyas sintéticas de bajo peso.

Tabla 1 Ejemplos de las alturas metacéntricas de boyas sintéticas empleadas por diversas administraciones

Diámetro / m	Altura metacéntrica / m	Administración
1,80	0,65	NL
2,30	0,40	F
2,45	0,50	F
2,60	0,95	NL
2,65	0,60	F
3,00	1,10	NL

Si se prevé que el personal de mantenimiento se suba a la superestructura de la boya, se calcularán los valores de la altura metacéntrica y del consiguiente ángulo de escora con el peso estimado del personal en el punto más elevado de trabajo en la superestructura, lo que confirmará si la altura metacéntrica sigue siendo positiva en esta situación; es decir, que la boya sigue siendo estable con el personal a bordo.

7.5 Presupuesto de masa y posición del centro de gravedad (G)

Antes de iniciar el cálculo de estabilidad, deben calcularse la masa y el centro de gravedad, sumando todas las masas de los componentes y los equipos en la boya y, entonces, se podrá determinar la posición del centro de gravedad.

A continuación, se obtienen la masa total m_b de la boya y la posición vertical del centro de gravedad (G) (véase el ejemplo en el ANEXO 1).

7.6 Volumen desplazado

El volumen desplazado puede calcularse de la forma siguiente:

La suma total de todas las fuerzas es cero

$$\sum F = 0$$

Para el equilibrio estático, el peso de la boya menos la flotabilidad es cero.

$$W - F_B = 0$$

$$(m_b \cdot g) - (V_B \cdot \rho \cdot g) = 0$$

$$V_B = \frac{m_b}{\rho}$$

7.7 Comprobación de la flotabilidad

Este cálculo garantiza que la boya no se hunda. El volumen de flotabilidad debe ser inferior al volumen total de la boya.

$$V_B < V$$

La diferencia entre V y V_B es la reserva de flotabilidad, lo que nos permite estimar la carga adicional que la boya puede soportar.

Para que la boya permanezca a flote, el volumen de la reserva de flotabilidad ha de ser positivo ($R_b > 0$).

7.8 Posición del centro de flotabilidad

A partir del valor de la flotabilidad, del centro de flotabilidad del flotador y de cada parte sumergida de la boya, puede calcularse la posición del centro de flotabilidad B (véase el ejemplo en el ANEXO B).

Nota:

La mayoría de los sistemas de dibujo CAD en 3D calculan los centros del volumen de determinadas formas.

7.9 Brazo adrizante

En equilibrio, la línea de flotación inicial es WL_0 y el centro de flotabilidad es B_0 .

La boya se escora en un ángulo θ relativo a su posición de equilibrio y flota sobre una nueva línea de flotación WL_1 . El centro de flotabilidad se desplaza de B_0 a B_1 .

M es el punto de intersección de la línea (B_0G) y la línea vertical que pasa a través de B_1 , y el punto M se conoce como el metacentro.

La distancia (B_0M) se denomina el radio metacéntrico y la distancia (GM) se llama la altura metacéntrica.

Para el ángulo de escora θ , un momento adrizante, anotado RM (del inglés, *righting moment*), se produce de la siguiente forma:

$$RM = m_b \cdot g \cdot GZ$$

GZ es el brazo adrizante.

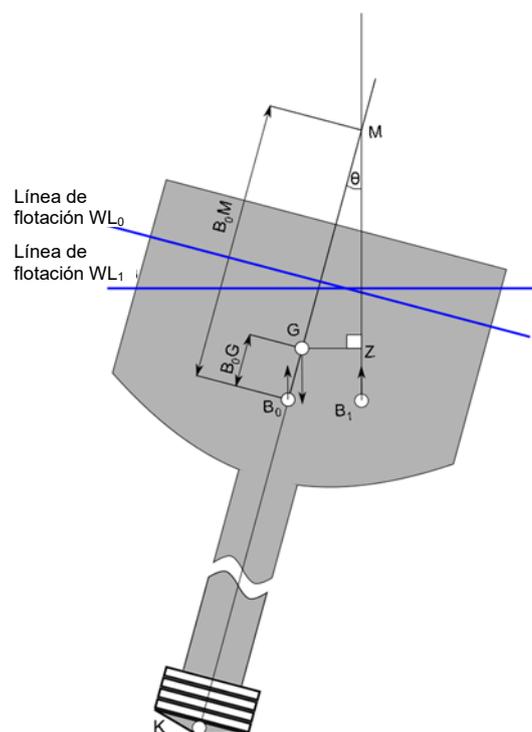


Figura 7 Altura metacéntrica

En el triángulo de ángulo recto GZM

$$GZ = GM \cdot \sin \theta \text{ entonces}$$

$$GZ = (B_0M - B_0G) \cdot \sin \theta$$

por lo tanto

$$RM = W \cdot (B_0M - B_0G) \cdot \sin \theta$$

Condición de estabilidad

Para que la boya sea estable, GM debe ser positiva y M debe ser siempre superior a G.

7.10 Ángulo de escora

El ángulo de escora θ que la boya podrá asumir en condiciones de viento y corriente puede calcularse, bien a partir de la información sobre la carga del viento y la corriente ofrecida en la Guía 1066 [1] o de otras fuentes sobre las cargas del viento y la corriente. No es práctico estimar las cargas extremas ejercidas por el hielo en movimiento.

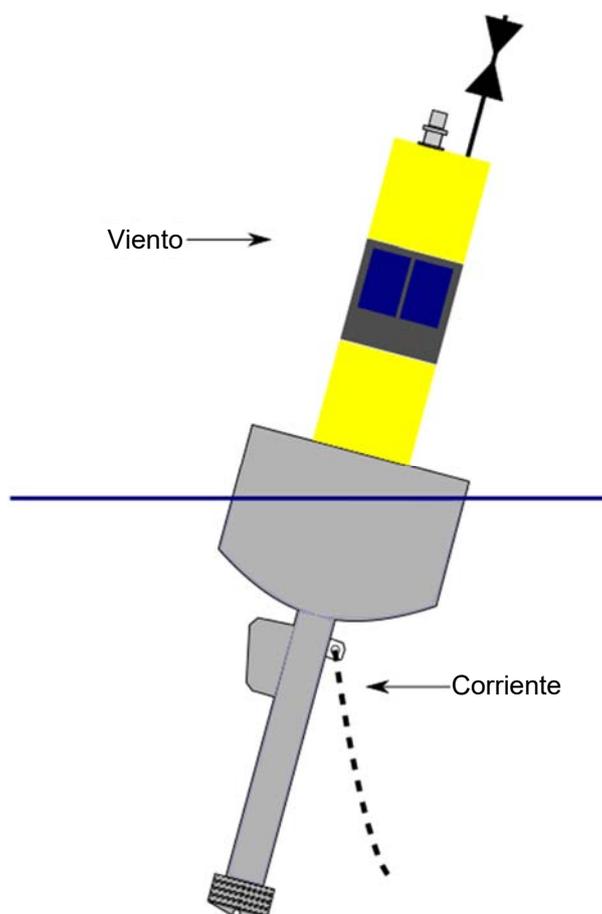


Figura 8 Ángulo de escora

El momento del área de la boya que se ve sometida a la carga del viento, alrededor del punto del asa de amarre y el momento del área sumergido de la boya sometida a la carga de la corriente, alrededor del asa de amarre, pueden sumarse y, así, calcularse el ángulo de escora resultante. Se suele suponer que el peor caso es cuando tanto los momentos producidos por las fuerzas del viento y la corriente intentan escorar ambos la boya en la misma dirección. La dirección de escora debida al flujo de la corriente dependerá de las partes sumergidas de la boya situadas tanto por encima como por debajo del asa de amarre.

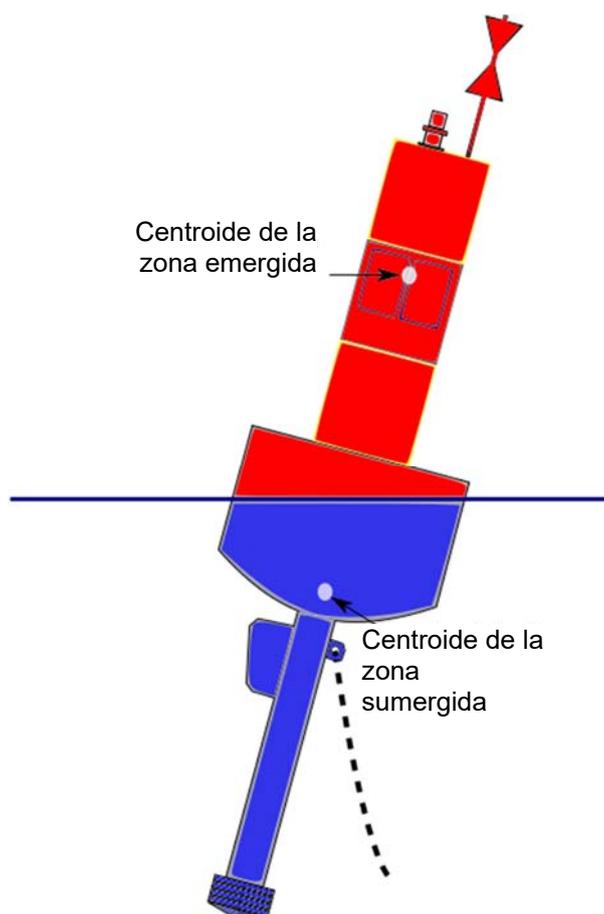


Figura 9 Áreas de las fuerzas del viento y del agua

La boya se ve constreñida por el amarre y pivotará alrededor del punto de conexión del amarre (asa de amarre). En la Figura 9, la fuerza del viento actuará sobre el área de la boya por encima de la línea de flotación, sombreada en rojo, y dicha fuerza actuará alrededor del centroide de esta zona. Por su parte, las fuerzas de la corriente en el área sumergida de la boya (en azul) actuarán alrededor del centroide de dicha área. Los momentos se toman alrededor del asa (o asas) de amarre. Las fuerzas del agua que actúan sobre la boya incluyen la corriente (de marea o de flujo), así como la corriente de superficie generada por el viento y el desplazamiento por oleaje.

$$\begin{aligned} \text{arrastre del viento [N]} &= \text{fuerza del viento [N/m}^2] \cdot \text{área proyectada emergida [m}^2] \\ \text{arrastre del agua [N]} &= \text{fuerza del agua [N/m}^2] \cdot \text{área proyectada sumergida [m}^2] \end{aligned}$$

El momento de la resistencia del viento [millas náuticas] se calcula multiplicando la resistencia del viento [N] por la distancia del centroide del área por encima del agua al punto de conexión del amarre [m].

El momento de la resistencia del agua [millas náuticas] se calcula multiplicando la resistencia del agua [N] por la distancia del centroide del área sumergida al punto de conexión del amarre [m].

Si la boya tiende a girar alrededor del punto de amarre en el sentido de las agujas del reloj, los momentos se toman como positivos y, por el contrario, si gira en sentido contrario, se toman como negativos. La suma de estos momentos alrededor del punto de amarre aporta un valor para el momento de volcado.

$$\tan(\theta) = \frac{\text{momento de vuelco [Nm]}}{\text{peso [N]} \cdot GM [m]}$$

Sólo es válida esta fórmula para ángulos de escora reducidos (inferiores a diez grados). Estos cálculos de escora aportarán orientación sobre el ángulo que la boya alcanzará a causa de determinadas fuerzas del viento y de la corriente. No obstante, a medida que aumenta el ángulo de escora, el resultado así calculado se volverá menos preciso, ya que cambiarán tanto la forma efectiva como el área proyectada de la boya.

Si se prevé utilizar una boya en unas condiciones determinadas de corriente, estos cálculos también se utilizarán para evaluar la posición de las asas de amarre, si tiene varias posiciones de conexión.

Nota:

Para el modelo de boya representado en estos diagramas, en que el asa de amarre se encuentra lejos del eje central, a los cálculos se tendrá que añadir el momento de escora debido a las fuerzas del amarre que se ejercen a una distancia del eje central de la boya (el brazo).

Al considerar el ángulo de escora, cabe resaltar que el máximo ángulo de escora previsto no deberá superar la mitad de la divergencia vertical (FWHM –anchura a media altura-) de la linterna.

8 MEDICIONES PRÁCTICAS

Al considerar alteraciones o la instalación de nuevos equipos en las boyas existentes, si los dibujos de diseño y cálculos no están disponibles, la medición práctica del peso, el francobordo y la altura metacéntrica pueden cobrar mayor importancia.

Las mediciones prácticas también pueden ser útiles para confirmar los valores calculados del centro de gravedad.

8.1 Centro de gravedad

Suponiendo que se disponga de una grúa capaz de izar la boya ya ensamblada, la posición del centro de gravedad se puede comprobar suspendiendo la boya por un asa de izar colocada lejos del eje central (véase la Figura 10). La boya debe colgar libremente y no estar constreñida por ninguna línea de manejo. El centro de gravedad se encontrará en la intersección de la línea de suspensión con el eje central de la boya, que se podrá registrar con facilidad mediante una fotografía digital, o medir con un inclinómetro en la boya.

8.2 Periodo de balanceo

La frecuencia natural de balanceo puede estimarse desplazando la boya y midiendo el periodo de balanceo. La boya debe flotar libremente y, a continuación, se la desplaza tanto como sea factible en una dirección y, después, se suelta. La medición del tiempo comienza cuando la boya alcanza su ángulo máximo de balanceo en la dirección opuesta y se detiene cuando la boya vuelve a esta posición máxima de balanceo. Para obtener el periodo medio de balanceo, se puede medir el tiempo a lo largo de dos o tres ciclos completos de balanceo. La medición del balanceo puede realizarse fácilmente con una grabación en vídeo de la boya balanceándose. La instalación de sensores de aceleración en la boya también suministrará información precisa. En el ANEXO C, se puede encontrar un ejemplo al respecto.

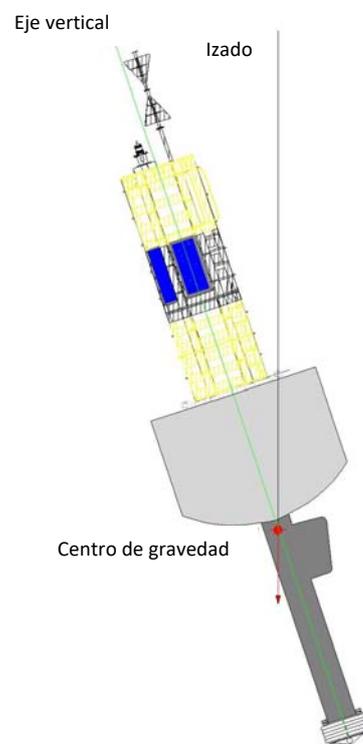


Figura 10 Una boya izada desde un punto de izado fuera de su eje central

La amplitud (ángulo) de escora no superará 10° / 15° de un lado al otro. Se podrá repetir el ensayo con unos amarres suspendidos de las asas de amarre de la boya, lo que demostrará los efectos de los cambios en la frecuencia de balanceo a causa del peso de amarre.

El periodo natural de balanceo es: $T = 2\pi \sqrt{\frac{J \cdot (1 + k)}{m_b \cdot g \cdot GM}}$

T periodo de balanceo, en segundos

J momento de inercia de la boya alrededor del eje a través del centro de gravedad, en kg*m²

k coeficiente de masa añadida (que puede oscilar de 0,1 a 1, en función de la forma del flotador y del tipo de faldón o cola tubular)

m_b masa de la boya, en kg

g aceleración debido a la gravedad, en m/s²

GM altura metacéntrica, en m

El estado de la boya debe ser coherente para m y GM.

El coeficiente de masa añadida (k) representa la cantidad de agua adyacente que se desplaza con la boya. Nótese que la masa del tren de fondeo no se tiene en cuenta en la fórmula arriba mencionada. Asimismo, recuerde que sólo es válida esta fórmula para ángulos reducidos y una posición estática de la boya.

8.3 Línea de flotación

Cuando se conoce el francobordo, pueden calcularse con facilidad los efectos derivados de añadir las cargas de amarre a la boya, así como estimarse el francobordo efectivo en condiciones de funcionamiento.

Si se dispone de instalaciones adecuadas de aguas en calma, además de una grúa capaz de izar la boya, se pueden realizar ensayos de flotación. Tanto el calado como la línea de flotación se pueden medir y, por tanto, confirmarse el francobordo.

En este punto, se pueden colocar pesas en la cubierta de la boya, posiblemente las que se emplearon en el experimento de inclinación, o de escora, que se colocan en los lados opuestos de la superestructura, para que la boya permanezca a flote en posición vertical. Dichas pesas serán de un tamaño suficiente para hundir la boya de manera significativa. Entonces, el desplazamiento (kg) por mm de inmersión se puede establecer (o confirmar los cálculos). Para asegurar la precisión de los resultados, este ensayo debe realizarse con dos o más juegos de pesas.

Nota:

La línea de flotación oscilará en función de la densidad del agua en que se encuentre a flote la boya (véase el apartado 6.13).

8.4 Altura metacéntrica

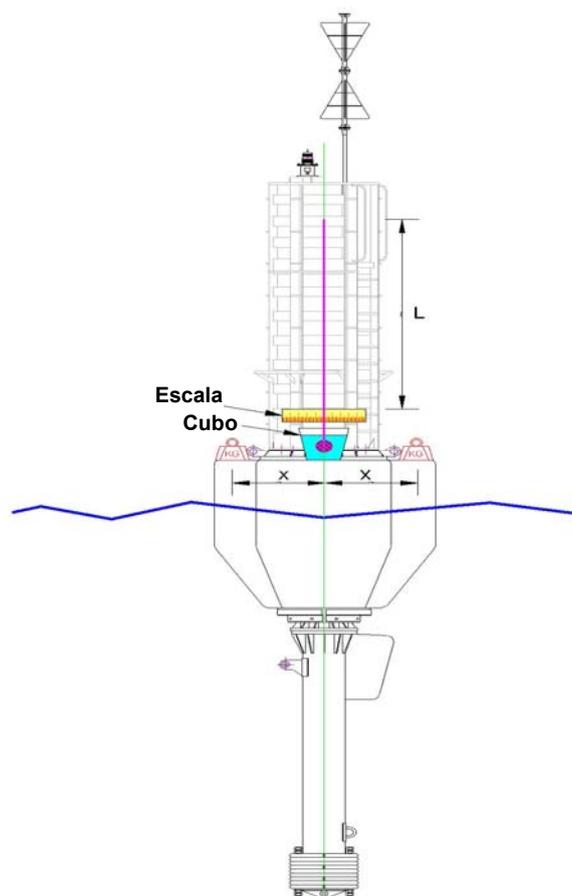


Figura 11 Medición de la altura metacéntrica

Se necesitan pesas, que se pueden colocar en el borde exterior de la cubierta de la boya para escorarla. A continuación, se podrá medir el ángulo de escora y utilizarlo para calcular la altura metacéntrica. Se utilizarán varias pesas para, en primer lugar, escorar la boya en una dirección y, después, en otra. Se podrá medir el ángulo de escora con un péndulo (véase la Figura 11) colocado en la boya y medir su movimiento con una escala horizontal.

$$\tan(\theta) = \frac{\text{desplazamiento horizontal}}{\text{longitud del péndulo}}$$

Además, el ángulo se puede medir con un inclinómetro o fotografiando la boya con una línea de referencia horizontal o vertical de fondo.

Se debe calcular la altura metacéntrica con distintas pesas de inclinación, o de escora.

Los trenes de fondeo de la boya deben estar completamente flojos, y no se permitirán otros pesos o personal sobre la boya durante la prueba de escora.

$$GM = \frac{\text{peso en cubierta} \cdot \text{distancia } x}{\text{peso} \cdot \tan(\text{ángulo de escora})}$$

Esto será válido para ángulos de escora reducidos (inferiores a cinco grados) y las mediciones se realizarán en aguas en calma. Los valores así calculados deben ser parecidos y, después, se obtendrá una media.

Si se emplea el péndulo, su masa se suele sumergir en un contenedor de agua para amortiguar su movimiento.

Si se utiliza el método fotográfico, las fotos se tomarán desde una dirección perpendicular al plano de la escora de la boya.

8.5 Pruebas de remolque

Cuando se prevé utilizar la boya en corrientes rápidas o situaciones fluviales, se pueden realizar pruebas de remolque para evaluar el funcionamiento de la boya en aguas en movimiento. Se remolca la boya desde su punto (o puntos) de amarre con un lastre en la línea de remolque que sea suficiente para mantener una pendiente hacia abajo en la línea desde la boya a dicho lastre.

A continuación, la velocidad de remolque se registra mediante los instrumentos del remolcador. Se puede estimar con facilidad el ángulo de escora mediante fotografías digitales u obtenerlo de los sensores colocados en la boya.

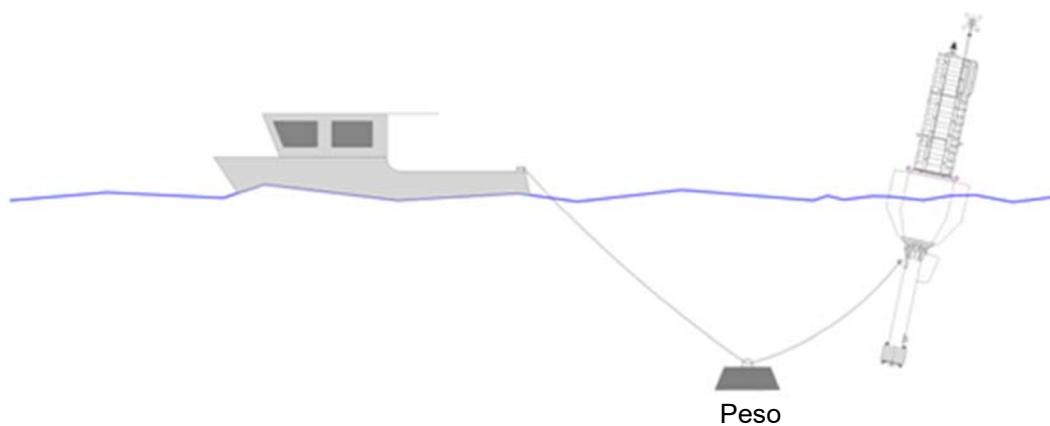


Figura 12 Pruebas de remolque

Alternativamente, puede utilizarse el chorro de la hélice de un buque grande contra el dique para producir un flujo constante de agua que pase por una boya amarrada.

Además, estas pruebas de remolque indicarán el asiento de la boya en aguas en movimiento. Cuando están sometidas a velocidades críticas de agua, algunas boyas experimentarán movimientos de balanceo transversal, de guiñada o de balanceo.

9 ESTABILIDAD CON ÁNGULOS DE ESCORA REDUCIDOS

Con ángulos de escora reducidos, B sigue un círculo centrado en M con un radio de BM (radio metacéntrico).

Se calculan GM y KM mediante las siguientes fórmulas:

$$GM = KM - KG$$

$$KM = KB_0 + B_0M$$

Se calcula B_0M mediante la siguiente fórmula, que incorpora la inercia del plano de agua (véase el apartado 6.6):

$$B_0M = \frac{I_f}{V_B}$$

La altura metacéntrica se calcula de la siguiente forma:

$$GM = (KB_0 + B_0M) - KG$$

donde la primera parte representa la estabilidad de forma y la segunda la de masa.

9.1 Estabilidad de masa y de forma

Para aumentar la estabilidad, se puede modificar bien la estabilidad de masa o bien la estabilidad de forma.

Si se aumenta la estabilidad de forma, se incrementa la distancia BM.

Para aumentar la estabilidad de masa, se debe aumentar GM, reduciendo G.

10 INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD DINÁMICA

Cada boya tiene sus periodos naturales de balanceo y oscilación vertical.

Cuando la boya está a flote, las oscilaciones a cada lado de la posición de equilibrio resultan de una fuerza externa. A lo largo del tiempo, estas oscilaciones se ven amortiguadas por la viscosidad del agua.

Un conocimiento del periodo natural de balanceo de la boya permite la estimación del valor de la altura metacéntrica, así como la estimación del comportamiento de la boya en las condiciones de oleaje correspondientes al lugar de amarre.

“Resonancia” es la tendencia de la boya a oscilar a una mayor amplitud en algunos periodos de ola que en otros.

- viento marino periodo de ola < 5 segundos, olas pequeñas e irregulares, caso raro de resonancia;
- fase de transición periodos de oleaje de entre 5 y 10 segundos, caso raro de resonancia;
- oleaje oceánico periodo de oleaje > 10 segundos, olas regulares, más casos de resonancia.

Un valor elevado de la altura metacéntrica dará lugar a que la boya vuelva rápidamente a la posición vertical en un movimiento veloz (periodo de balanceo reducido). Una altura metacéntrica reducida resultará en un movimiento lento de oscilación (periodo de balanceo largo), posiblemente con un desplazamiento excesivo de la vertical.

La eficacia de la ayuda visual a la navegación en la boya dependerá de que sea claramente visible. Si la boya tiene un movimiento rápido o espasmódico, será difícil reconocer con claridad la marca diurna o el ritmo de la luz. Por lo tanto, se prefiere un movimiento lento y constante; sin embargo, la amplitud del balanceo no debe ser excesiva.

11 ESTUDIO DE CURVAS DE ESTABILIDAD (CURVAS DE BRAZO ADRIZANTE)

La estabilidad es la capacidad de la boya para volver a la posición vertical cuando acciones externas, como el viento, el oleaje y la corriente la han desplazado. La estabilidad se considera adecuada si la boya mantiene dicha capacidad en todas las situaciones.

Los factores que pueden afectar a la estabilidad son:

- La carga de la boya;
- La presencia de momentos de vuelco debido a fuerzas externas.

Se puede estudiar la estabilidad mediante la curva del brazo adrizante.

Se suelen elaborar dos curvas, una sin amarre y otra con el amarre suspendido verticalmente por debajo de la boya.

Método:

Para cada ángulo de escora θ , se puede determinar el valor del brazo adrizante GZ.

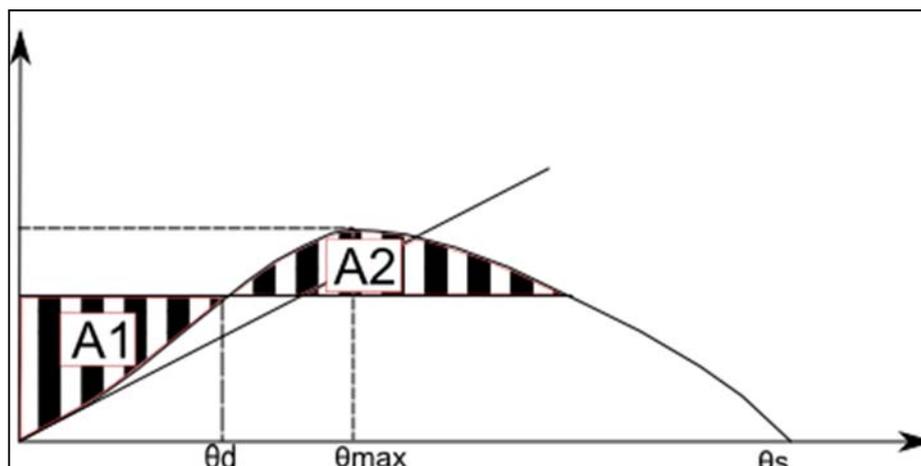


Figura 13 Curva GZ

Análisis de la curva:

El área total bajo la curva de estabilidad es la estabilidad de reserva o la cantidad de energía adrizante.

Pendiente de la curva:

La pendiente inicial de la curva es el valor del módulo GM de la estabilidad inicial.

El ángulo del límite de estabilidad dinámica (θ_d):

El ángulo en que las áreas A1 y A2 son iguales.

En dicho ángulo, la energía de restauración (área A2) es igual a la energía de escora (área A1).

Existe un peligro de volcado más allá de dicho ángulo debido a las cargas externas que actúan de forma dinámica sobre la boya.

Ángulo del límite de estabilidad estática (θ_{max}):

El ángulo θ_{max} es el punto más elevado de la curva, que es el ángulo máximo de estabilidad.

El ángulo del límite de volcado estático (θ_s):

Este ángulo (θ_s) es el punto donde desaparece el brazo adrizante y se produce el volcado estático.

Mal allá de dicho ángulo, el momento adrizante se convierte en negativo e, inmediatamente, se produce el volcado.

12 COMPROBACIÓN DE SEGURIDAD DE LA ESTABILIDAD

La curva de estabilidad es difícil de elaborar mediante el cálculo manual, porque la forma del plano de agua de la boya cambia a medida que la boya se escora (salvo las boyas con cuerpos esféricos).

Se puede realizar una simple evaluación de seguridad, calculando los momentos de vuelco a 90° de escora, lo que supone que la boya ha sido tumbada por el viento o el oleaje. Se propone que este cálculo se realice sin tener en cuenta los efectos de los amarres, ya que éste es el caso de estabilidad más extrema.

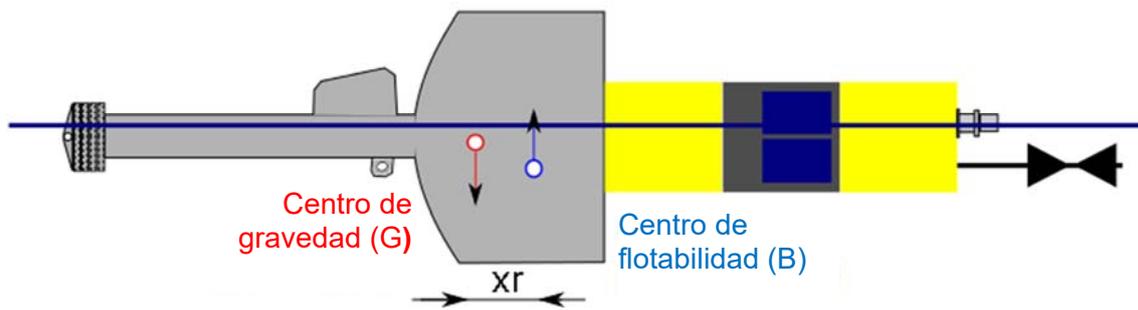


Figura 14 Boya en posición horizontal

El centro de gravedad G permanece en la misma posición que en los cálculos iniciales. Por su parte, el volumen desplazado de la boya también es el mismo que el calculado inicialmente. Sin embargo, ahora dicho volumen lo aporta la nueva sección sumergida del cuerpo de la boya; o sea, partes de la cola tubular y, posiblemente, parte de la superestructura. Si la superestructura fuera estanca, su elemento flotante puede ser significativo. La posición horizontal de este nuevo centro de flotabilidad B se calcula y las posiciones relativas de G y B demostrarán si la boya tenderá a enderezarse o volcarse.

Ahora, el brazo adrizante GZ es xr y el valor del momento adrizante será:

$$RM = m \cdot g \cdot GZ = m \cdot g \cdot (xr)$$

13 REFERENCIAS

- [1] Guía 1066 – Diseño de ayudas flotantes a la navegación
- [2] NAVGUIDE de la IALA
- [3] Guía 1094 – Marcas diurnas para ayudas a la navegación

ANEXO A DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD G DE LOS COMPONENTES DE UNA BOYA

Superestructura de aluminio	Cantidad	Masa total [kg]	G por encima de la base de superestructura [mm]	Momento [kg x mm]
Parte inferior rebordeada		52,5	14	756
Reborde de fijación estándar	1	50,0	10	500
Refuerzos	6	2,0	103	207
Refuerzos debajo de la escalera	2	0,5	103	49
Estructura central		162,4	1.541	250.344
Cantidades verticales	6	80,0	1.660	132.800
Pasamanos	36	5,0	1.660	8.300
Planchas de revestimiento fijas	33	30,0	1.540	46.185
Planchas de revestimiento de 6 mm	5	9,0	120	1.080
Planchas de revestimiento desmontables	2	2,0	700	1.388
Barras de escalera	7	4,0	1.020	4.080
Barandilla	1	8,0	1.000	8.000
Barandilla superior	1	4,0	1.931	7.724
Planchas de revestimiento del suelo	5	7,0	2.040	14.280
Planchas de revestimiento cerca del suelo, escalones laterales	1	0,5	2.050	934
Suelo de aluminio	1	9,0	2.110	18.990
Placa de identificación	2	4,0	1.650	6.584
Partes superiores		18,0	3.149	56.763
Tirantes de escalera	2	5,0	2.722	13.608
Anillo superior	1	5,0	3.300	16.500
Plancha superior de la base de la luz	1	6,0	3.300	19.887
Base de la luz	1	2,0	3.384	6.768
Soporte de marca diurna		7,0	3.484	24.234
Tubo de aluminio	1	3,0	2.825	8.475

Tubo de carbono	1	2,0	3.800	7.600
Plancha de conexión	1	0,5	3.825	1.740
Reborde del soporte de marca diurna	1	0,5	4.300	2.150
Refuerzos de reborde 35x35	4	0,50	4.283	2.142
Tubo de reborde	1	0,5	4.255	2.128
Tornillos varios		10,0	2.050	20.500
Soldaduras		10,0	1.500	15.000
TOTAL		260	1.414	367.597

La altura del centro de gravedad G desde el datum es $367.597 / 260 = 1.414$ mm.

Determinación del centro de gravedad G de una boya: boya de acero + superestructura de aluminio

	Masa total [kg]	G por encima de la quilla [mm]	Momento [kg x mm]
Marca de tope	10	9.170	91.700
Superestructura de aluminio	260	7.320	1.903.200
Equipos	100	7.120	712.000
Plancha de aislamiento para el acero / aluminio	5	5.815	29.075
Flotador de acero	2.870	4.305	12.355.350
Cola tubular	1.105	2.455	2.712.775
Lastre	650	120	78.000
Masa total	5.000		17.882.100

La altura del centro de gravedad de la boya desde el datum K es:

$17.882.100 / 5.000 = 3.576$ mm.

ANEXO B DETERMINACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD G DE UNA BOYA

Componentes	Volúmenes [litros]	Flotabilidad [kg] con una densidad del agua de 1.026 kg/l	G por encima del datum K [mm]	Momento [kg x mm]
Parte cilíndrica del flotador	3.231	3.315	5.439	18.030.285
Parte truncada del flotador	1.267	1.300	4.756	6.182.800
Tornillos	5	5	4.055	20.275
Reborde de conexión	24	25	4.146	103.650
Anillo en cono	3	3	4.760	14.280
Cola tubular	195	200	2.454	490.800
Tornillos de lastre	2	2	238	476
Lastre	146	150	165	24.750
TOTAL	4.874	5.000		24.867.316

La altura del centro de gravedad de la boya desde el datum K es:

$$24.867.316 / 5.000 = 4.973 \text{ mm}$$

El diámetro de la boya es de 2,65 m.

El volumen de la boya es de 4,874m³.

B₀K es 4,973m

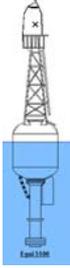
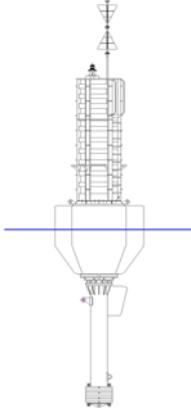
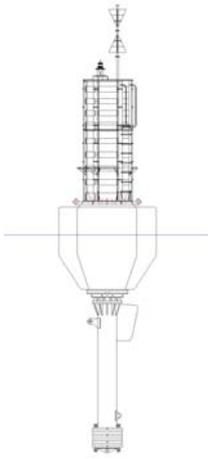
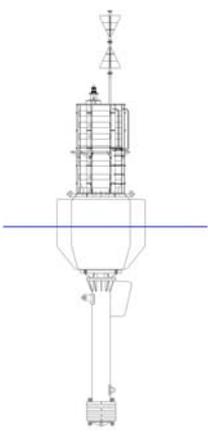
KG es 3,576m

$$B_0M = \frac{I_f}{V_B} = \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot D^4 \cdot \frac{1}{V_B} = 0.497m$$

B₀M se calcula

$$GM \text{ se calcula } GM = KM - KG = B_0M + B_0K - KG = 0.497m + 4.973m - 3.576m = 1.894m$$

ANEXO C EJEMPLOS DE LOS PERIODOS DE BALANCEO DE DIFERENTES TIPOS DE BOYA

Boyas de acero			
Volumen	7,50 m ³	12 m ³	26 m ³
Masa	5.000 kg	9.500 kg	15.000 kg
Periodo natural de balanceo	5,80 segundos	7 segundos	7 segundos
Boyas sintéticas modulares	A8L	B6L	C5L
Lastre de 650 kg			
Volumen	9 m ³	7 m ³	6 m ³
Masa	3.650 kg	3.400 kg	3.150 kg
Periodo natural de balanceo	4,85 segundos	4,70 segundos	4,20 segundos