



TRABAJO FIN DE GRADO

JUNIO - 2017

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

GRADO EN NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO, PORTUGALETE

**AUTOR: JEAN-FRANÇOIS BOUDESSEUL
DIRECTOR: ALBERTO LÓPEZ ARRAIZA**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar las gracias a mi director del trabajo de fin de grado, Dr. Alberto López Arraiza por su asesoramiento y ayuda recibida durante todo el proceso de la realización del presente trabajo.

En segundo lugar a la familia por su apoyo, motivación y preocupación.

También agradecer a todos los profesores que hasta ahora he tenido, por haberme transmitido todos los conocimientos que sé, y por su dedicación, apoyo y confianza. He tenido la suerte de haber tenido como profesores, muy buenos profesionales.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN-----	1
2.- ESTADO DEL ARTE-----	3
2.1.- RESISTENCIA AL AVANCE -----	3
2.1.1 <i>Determinación de la resistencia al avance</i> -----	4
2.1.2 <i>Coefficientes adimensionales</i> -----	7
2.2.- HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS -----	9
2.3.- ESTABILIDAD -----	10
2.4.- NORMATIVA -----	14
2.5.- EFECTOS DEL OLEAJE SOBRE EL BUQUE -----	16
3.- OBJETIVOS -----	19
4. ESTUDIO DE LAS FORMAS DEL CASCO -----	21
5.- DESARROLLO-----	23
5.1. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE -----	23
5.2. CÁLCULO DE LA UNIDAD PROPULSORA DEL BUQUE -----	28
5.2.1 <i>Potencia total</i> -----	28
5.2.2 <i>Determinación del diámetro ideal de la hélice.</i> -----	33
5.2.3 <i>Elección del timón</i> -----	35
5.3. ESTUDIO DE ESTABILIDAD DEL BUQUE-----	36
5.3.1 <i>Cálculo de peso en rosca y centro de gravedad</i> -----	36
5.3.2 <i>Compartimentado del buque</i> -----	41
5.3.3 <i>Determinación de la estabilidad del buque en diferentes situaciones de carga</i> ---	55
5.4. COMPORTAMIENTO DEL BUQUE EN LA MAR-----	72
6.- CONCLUSIONES-----	77
7.- REFERENCIAS BIOGRAFICAS -----	79

1.- INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene tres apartados todos ellos relacionados con el programa de diseño y análisis de ingeniería naval **Maxsurf**.

El primer apartado trata del estudio hidrodinámico y de la resistencia al avance del buque del proyecto que es un petrolero. El estudio se lleva a cabo con el módulo *Resistance* del programa nombrado anteriormente.

El segundo, se lleva a cabo con el módulo *Stability* y, consta a su vez de dos partes, la primera que corresponde al cálculo y posterior distribución de los espacios de carga del buque, siguiendo las normativas vigentes internacionales y, la segunda, se analiza diferentes situaciones de carga que se pueden dar en la vida útil del buque del trabajo.

Por último, el tercer apartado, el cual se lleva a cabo con el módulo *Motions*, se realizará un estudio sobre el comportamiento del buque simulando la navegación en un canal de experiencias con un oleaje determinado.

2.- ESTADO DEL ARTE

En el presente apartado se va a realizar una revisión del estado del arte, de los temas principales que posteriormente se tratan en el desarrollo del trabajo fin de grado.

2.1.- Resistencia al avance

En la actualidad, los estudios de la resistencia al avance de un buque son fundamentales en la fase de diseño del mismo para obtener embarcaciones más eficientes desde los puntos de vista hidrodinámico y energético.[1]

La resistencia al avance de un buque se puede considerar, como la fuerza que opone el fluido al movimiento y, se denomina resistencia total (R_T). La resistencia está asociada con la potencia y el consumo de combustible a las distintas velocidades de navegación (V_s), por ello interesa conocerla con exactitud. También permite definir y rediseñar las dimensiones y formas de la carena que consigan que la potencia necesaria para la navegación sea mínima, por motivos económicos en cuanto al ahorro de combustible y emisiones contaminantes. [1,2]

La R_T influye en la determinación de la potencia efectiva como se puede observar en la ecuación siguiente:

$$P_E = R_T * V_S \quad (1)$$

Donde;

$P_E =$ Potencia efectiva (W)

$R_T =$ Resistencia total (N)

$V_S =$ Velocidad de servicio (m/s)

A su vez, la R_T depende de la resistencia por formación de olas, viscosa y del aire como se puede ver en la ecuación 2. [2,3]

$$R_T = R_w + R_V + R_A \quad (2)$$

Donde:

R_w = Resistencia por formación de olas (N)

R_T = Resistencia total (N)

R_v = Resistencia viscosa (N)

R_A = Resistencia al aire (N)

La R_w es la fuerza que se opone al movimiento del buque. Cuando un buque navega en una superficie libre agua-aire, la variación de presiones sobre el cuerpo genera olas que acompañan al buque en su movimiento. Las olas modifican el campo de presiones sobre el buque. En algunas zonas aumenta la presión sobre la que había sin olas y en otras disminuye, por lo que al integrarlas, el resultado no es nulo, sino que aparece una fuerza que se opone al movimiento.

El valor de esta resistencia depende de la velocidad y de las características principales y carena del buque [1].

La R_v es la resistencia de presión de origen viscoso. Dicho de otra forma, cuando un buque se encuentra sumergido en un fluido viscoso. Se establece alrededor del buque una capa límite y presión sobre el casco. Esta capa deja de ser continua a la altura de la popa, debido a que las líneas de popa son menos finas y la curvatura del casco grande. En la zona de popa se forman unos remolinos que incrementan la resistencia al avance. Por lo tanto la velocidad y presión del fluido en proa es mayor que en popa. [1,3]

La R_A es la resistencia al avance debido a al flujo del aire sobre la estructura del buque. Cuanto mayor sea la obra muerta del buque, mayor será el efecto de ésta. Este parámetro en la resistencia total no es muy notable, su valor se encuentra en torno al 8%. [1,2]

2.1.1 Determinación de la resistencia al avance

La predicción de la resistencia es un problema común en los principios de los proyectos. Una de las especificaciones importantes que debe cumplir el buque del proyecto es la velocidad de servicio y el consumo. [3,4]

El cálculo de la resistencia al avance se puede realizar escalando el buque y llevando a cabo ensayos en un canal de experiencias o *towing tank*, o mediante distintos programas informáticos que implementan métodos estadísticos y fluidodinámica.

En el caso de elaborar el modelo a escala, se hacen las pruebas hidrodinámicas en los canales de experiencias del prototipo diseñado. Tras concluir dichas pruebas se presenta una dificultad considerable; escalar los resultados del modelo, al buque en tamaño real.

Para ello, se deben cumplir una serie de semejanzas [2,4]:

- Semejanza geométrica: Significa que el modelo a escala y el buque deben tener la misma forma geométrica pero a una escala determinada.
- Semejanza dinámica: Esto implica que todas las fuerzas del flujo deben de escalarse y que, los vectores de fuerza tendrán la misma dirección.
- Semejanza cinética: Las velocidades y aceleraciones relacionadas con el flujo deben de escalarse. En este punto surge un problema, que no son escalables la gravedad y propiedades del agua. Por lo que *William Froude* propuso la "ley de velocidades correspondientes" o "ley de comparación".

Froude estableció que los perfiles de olas generadas por un modelo a escala y éste a tamaño real eran similares si se cumplía las siguientes expresiones (Ley de comparación) [2,4].

$$\frac{V_S}{L_S} = \frac{V_M}{L_M} \quad (3)$$

Donde;

V_S = velocidad del buque (m/s)

V_M = velocidad del modelo a escala (m/s)

L_S = Longitud del buque (m/s)

L_M = Longitud del buque (m/s)

Cuando se utilizan programas informáticos específicos, éstos tienen implementados distintos métodos estadísticos que proporcionan el cálculo del valor de la resistencia al avance del buque a distintas velocidades de navegación, de forma rápida y con un margen de exactitud aceptable. También nos indican la influencia de diversos parámetros de la geometría de la carena, para

minimizar la resistencia al avance y por lo tanto, la potencia propulsora y el consumo de combustible.[3,4]

Los métodos utilizados en la determinación de la resistencia al avance son tres:

- Métodos empíricos y teóricos. Estos métodos son precisos pero lentos. Como por ejemplo:

El método de *Holtrop* que es el que posteriormente se utilizará durante el desarrollo del trabajo.

El método de análisis de *Holtrop* se basa en una serie de ecuaciones de regresión realizadas a partir de los resultados de ensayos con modelos no relacionados entre sí, por una variación sistemática de sus características. [3,4]

Holtrop, investigador del canal de Wageningen (Holanda). Utilizó la base de datos de todos los parámetros geométricos de los modelos ensayados y los resultados de los ensayos e introdujo estos datos en un programa estadístico de correlaciones múltiples cruzadas.[6,1]

Probó regresiones polinómicas tomando diferentes grupos de parámetros para poder obtener las curvas con el menor error cuadrático medio. Estas curvas se utilizarán también posteriormente durante el desarrollo del trabajo [2].

- Series sistemáticas. Una serie sistemática de formas es un conjunto de formas de carenas, relacionadas entre sí de una forma geoméricamente sistematizada, están estudiadas para tener la mínima resistencia al avance y, han sido ensayadas en un Canal de Experiencias.

Las series sistemáticas se definen utilizando parámetros adimensionales, como por ejemplo: L/B , B/T , C_b , etc

Ejemplo de series sistemáticas más comunes: Serie 60, HSV A [2,4].

- Métodos analíticos y numéricos. Son técnicas matemáticas de resolución numérica de las ecuaciones de mecánica de fluidos aplicadas al caso del buque. Estas técnicas se denominan *computational fluid dynamics* (CFD). Los programas de CFD predicen el perfil de la ola generada por el buque, las líneas de corriente, etc.[2,4]

2.1.2. Coeficientes adimensionales

Estos coeficientes se utilizan para extrapolar los datos de los modelos a escala, a la embarcación real y predecir comportamiento y viabilidad del proyecto. Existen diferentes coeficientes adimensionales como por ejemplo, el que está asociado a la resistencia (ecuación 4) o el de la velocidad.[2,4]

$$C_T = C_V + C_W \quad (4)$$

Donde;

C_T = Coeficiente de resistencia total del casco

C_V = Coeficiente de resistencia viscosa

C_W = Coeficiente por formación de olas

En el presente trabajo se utiliza el coeficiente adimensional de velocidad denominado número de *Froude* (FN), que es el más utilizado en la arquitectura naval. Este coeficiente depende de la velocidad, eslora y gravedad. Se determina utilizando la ecuación siguiente.[2,3]

$$FN = \frac{V_S}{g^* L_{pp}} \quad (5)$$

V_S = Velocidad de servicio (m/s)

g = Gravedad $9,81 \frac{m}{s^2}$

L_{pp} = Eslora entre perpendiculares (m)

En la gráfica de la figura 1, se puede comprobar si el buque del proyecto cumple con el intervalo correspondiente a la categoría de buques tanque, entrando en el eje de abscisas con el valor obtenido del número de *Froude*, que se calculará posteriormente.

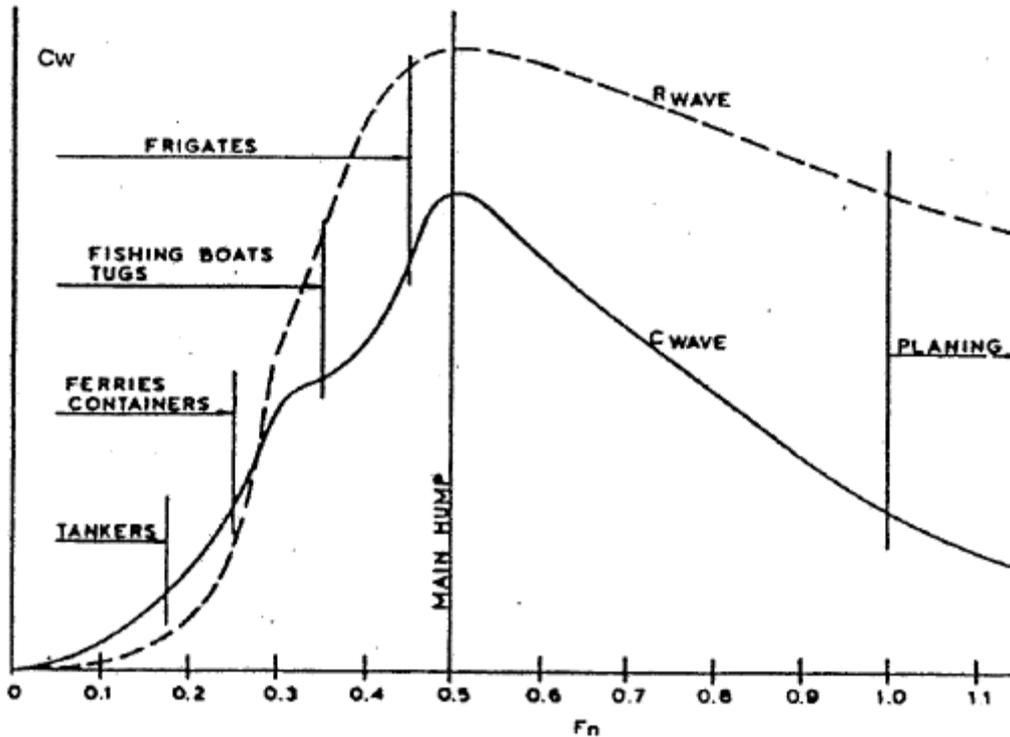


Figura 1. Curva variación $F_n - C_w$ [1]

Además, la figura 1 también indica la resistencia correspondiente por formación de olas (C_w) del casco, en función del número de Froude. A cada tipo de buque le corresponde una F_n distinto, debido a que cada tipo de buque tiene una carena diferente [2].

Observando la gráfica, se puede establecer que para $F_n < 0,1$ no existe casi resistencia por formación de olas (R_w), pero cuando pasamos a $F_n = 0,15$ se forma una ola en la proa y un valle en el hombro de proa y también aparecen olas transversales y divergentes. A $F_n = 0,50$, aparece un *main hump* o joroba debido a las interferencias entre las olas de proa y popa. A velocidades $F_n > 0,5$ se genera algo de planeo en las zonas planas de la popa, el buque despega apenas y la resistencia por formación de olas disminuye. Cuando F_n llega al valor de 1, existe un *planing* total y la R_w disminuye bastante.[1,2]

En el caso del buque del trabajo, al tener la popa tipo *tramson* ó tipo espejo interesa que el buque navegue sobre su propia ola, para que la cresta de popa se forme fuera del buque, dejando seco el espejo y reduciendo en lo posible la resistencia viscosa [3,4].

2.2.- Herramientas informáticas

En la actualidad, en el mercado existe un número elevado de programas informáticos de diseño naval. Como por ejemplo *Foram* [5] o *Cintranaval* [6], que son software empleados en la arquitectura naval.

El programa informático utilizado para el desarrollo del trabajo ha sido **Maxsurf**. Este programa es utilizado actualmente por los ingenieros navales para la elaboración de los proyectos de barcos, tanto de recreo, yates, veleros, etc, como buques mercantes, sean petroleros, graneleros, remolcadores, etc.

El Software dispone de ocho módulos:

- *Modeler*, se emplea para el moldeado de las embarcaciones.
- *Motions*, es utilizado para analizar la respuesta del buque en sistemas de oleajes determinados.
- *Multiframe*, utilizado para el análisis de estructuras, calculo de cargas inducidas por movimiento, etc.
- *Resistance*, utilizado para el estudio de la resistencia al avance de los buques.
- *Shape Editor*, se emplea para diseñar estructuras y desarrollarlas.
- *Stability*, permite diseñar y distribuir los espacios internos de las embarcaciones.
- *Struture*, se utiliza para el diseño y moldeado primario de estructuras.
- *VPP*, permite predecir el comportamiento de veleros en diferentes condiciones de viento.

De todos ellos en el presente trabajo se emplearán el módulo *Resistance*, *Stability* y finalmente el *Motions*.

El programa elegido para la realización del trabajo ha sido **Maxsurf** [7] por la sencillez que supone su manejo, por las herramientas que posee para el diseño naval y sus métodos de análisis, que cumplen con las expectativas del proyecto.

Los conocimientos adquiridos del programa durante el período de enseñanza superior en la asignatura: “Hidrodinámica, Resistencia y Propulsión Marina” de 4º curso del Grado en Náutica y Transporte Marítimo y su manejo intuitivo, han hecho que finalmente se optara por su utilización como herramienta principal del presente proyecto.

2.3.- Estabilidad

La estabilidad es la propiedad que tienen los buques de recuperar su posición inicial cuando la pierde por causas externas. Varios son los conceptos que influyen en el estudio de la estabilidad, como por ejemplo:

- Centro de gravedad (G), se define como el punto en el cual se aplica la fuerza total del peso del mismo o desplazamiento (Δ). El centro de gravedad depende de la distribución de los pesos en el buque, su altura KG que se mide desde la línea base que pasa por la quilla va a depender de la cantidad de pesos altos o bajos que se cargan. [8,9]

- Metacentro (M), se considera a la intersección de las direcciones de los empujes que ejerce el agua sobre el casco cuando el buque se encuentra adrizado y cuando éste cambia su posición un ángulo pequeño (8° ó 10°). [8,9]

- Centro de carena (C), se define como el punto en el cual se aplica la fuerza de empuje (E) o presión. El (C) varía de acuerdo a la forma de la parte sumergida, es decir, que depende de la forma de la carena. [8,9]

Dependiendo de la posición del metacentro con respecto al centro de gravedad existen tres clases de equilibrios:

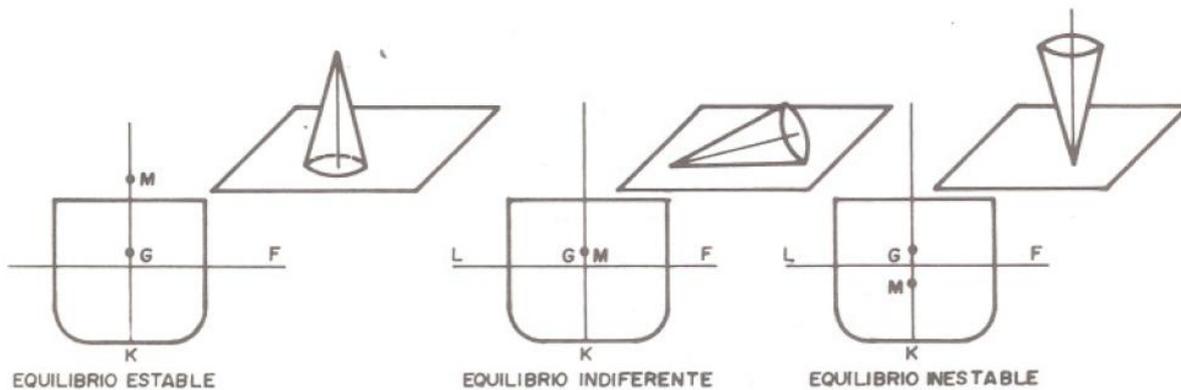


Figura 2. Tipos de equilibrios [8]

1. Equilibrio estable, es el que posee un buque en condiciones normales de navegación. El metacentro se encuentra por encima del c.d.g, siendo la altura metacéntrica positiva. En esta condición se cumple que $GM > 0$ y $KM > KG$. En esta situación de equilibrio los buques pueden navegar con seguridad. [8,10]
2. Equilibrio indiferente, en esta situación el c.d.g coincide con el metacentro, siendo por lo tanto la altura metacéntrica cero. La estabilidad es nula porque no se crea par de adrizamiento, por lo que si es aplicada una fuerza exterior se escorará el buque hasta que para el impulso de esa fuerza. Cumpliéndose $GM = 0$ y $KM = KG$. No es aconsejable navegar en esta situación.[8,10]
3. Equilibrio inestable, en este caso la estabilidad es negativa, debido a que la altura metacéntrica es negativa porque el c.d.g está por encima del metacentro, y el par de estabilidad se convierte en un par escorante. En este caso se cumple $GM < 0$ y $KM < KG$. [8,10]

Una vez visto las situaciones de equilibrio que se podrían darse en la vida útil de buque del proyecto, se continua este apartado explicando el uso de las curvas hidrostáticas del buque que se muestran más adelante en el trabajo.

Cuando el buque del trabajo se encuentra a flote, el calado varía de un mínimo con un desplazamiento (Δ) en rosca a un máximo con un desplazamiento (Δ) en máxima carga.

Cuando varía el calado varía el volumen de carena, la superficie de flotación, altura del metacentro, el centro de carena, etc. Todos estos valores se agrupan en una tabla o gráfica, la cual indican los valores que ellos van adquiriendo para cada uno de ellos. Estas curvas son suministradas por los astilleros. [8]

Otra curva que posteriormente se analiza, es la curva de estabilidad para grandes escoras, que es la representación gráfica del brazo GZ, en función de la escora θ . El brazo GZ se calcula a través de la ecuación siguiente:

$$GZ = KN - KG \operatorname{sen} \theta \quad (6)$$

Donde;

GZ = Brazo adrizante

KG = Centro de gravedad del buque

θ = Ángulo de escora del buque

KN = Brazo palanca

El valor del KN se obtiene de las curvas pantocarenas o KN. En estas curvas, el eje de abscisas representa las toneladas de desplazamiento (Δ) y en las ordenadas se representa los valores de los brazos KN en (m). Cada curva de la gráfica de brazos KN viene dado para un determinado ángulo de escora. En las curvas se entra con el valor del desplazamiento y con el ángulo de escora y a continuación se obtiene el valor del KN en (m). [8,10]

Seguidamente se procede al análisis con más detalles de la de la curva de estabilidad.

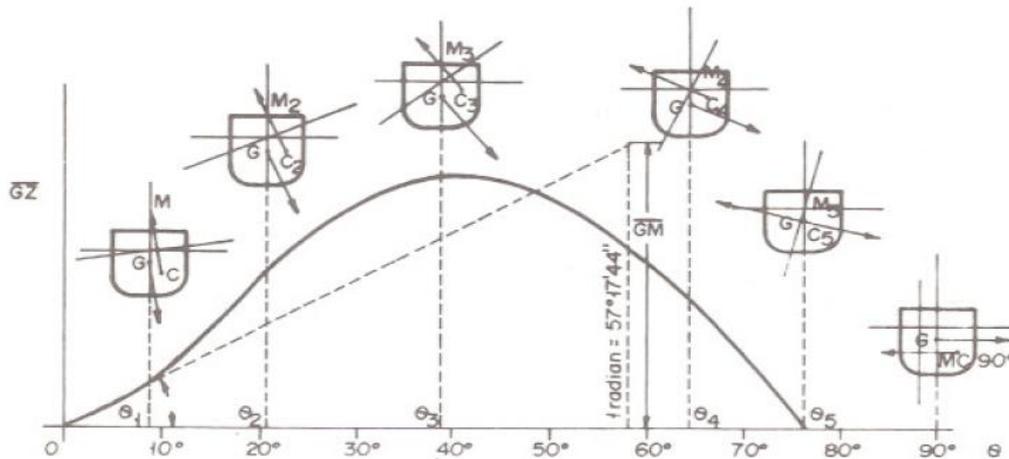


Figura 3. Curva de brazo GZ [8]

En la curva de brazos GZ de la figura 3, la cual se parece a la del buque del proyecto en las diferentes situaciones de cargas que se verán más adelante.

Como se puede observar la curva empieza en el origen de coordenadas, por lo que la escora es nula, es decir, el buque está adrizado y $\theta = 0$, $GZ = GM$, $\text{sen } \theta = 0$. Después desde 0° hasta θ_1 es una línea recta, donde tiene límite la estabilidad inicial. Siguiendo la curva de estabilidad de θ_1 hasta θ_2 , se observa que aumenta rápidamente la pendiente y el seno crece proporcionalmente al ángulo θ . La curva sigue aumentando pero con una pendiente menos pronunciada, hasta alcanzar su valor máximo en θ_3 y máximo GZ. El brazo GZ máximo debe de corresponder a escoras superiores a los 30° ó 35° . A partir de aquí la curva comienza a disminuir hasta el ángulo de escora θ_5 , en el cual el GZ se anula porque $GM = 0$ cuando coincide el metacentro con el c.d.g y el buque tiene equilibrio indiferente.

Después del ángulo θ_5 , donde la curva corta al eje de las abscisas el valor del $GM < 0$ y el buque tiene equilibrio inestable, por lo que podría dar la vuelta. [8,9]

Una vez visto las diferentes tipos de curvas que se pueden dar en la estabilidad, se continúa el apartado con las superficies libres.

El buque del proyecto dispone de una serie de tanques tanto de combustible, agua dulce, aceites, etc. Estos cuando están llenos se comportan como un sólido y no hay problema por superficies libres, pero cuando los tanques contienen líquidos cuya cantidad es inferior a la capacidad total del tanque, entonces se producen superficies libres. Debido a que cuando el buque se balancea o cabecea, los líquidos contenidos en los tanques tratan de conservar la superficie horizontal, por lo que, a los tanques que contienen una cantidad inferior al 98% de

su capacidad total, se dice que tienen superficies libres. Estas producen pérdida de estabilidad al buque. En la figura siguiente se muestra una situación típica de superficies libres. [8,10]

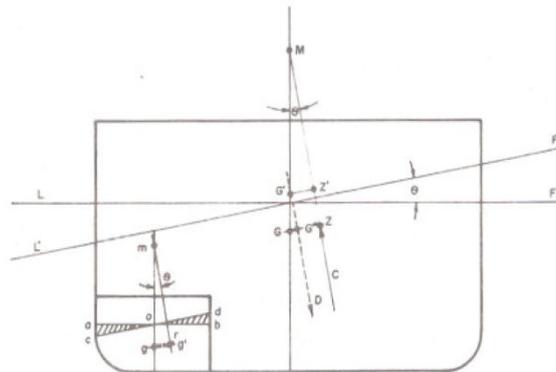


Figura 4. Situación de superficies libres [8]

En la figura 4 se presenta el buque del proyecto con un tanque a la mitad de su capacidad. Al escorarse el buque un ángulo θ , la superficie del tanque ab que tenía el tanque cuando el buque estaba adrizado cambia a cd , manteniéndose paralela a la línea de flotación $L'F'$.

El c.d.g del buque cambia de la posición G a G'' y el c.d.g del tanque también pasa de g a g' .

Como se puede comprobar en la ilustración, debido al efecto de las superficies libres, se produce una subida virtual del c.d.g G a G' . La corrección por superficies libres se realiza a través de la siguiente fórmula: [8]

$$G'Z' = GZ - GG' * \text{sen } \theta \quad (7)$$

2.4.- Normativa

Los reglamentos utilizados en el presente trabajo para el apartado de distribución de los espacios del buque para posteriormente aplicar los criterios de estabilidad han sido:

- Marpol 73-78-90
- SOLAS
- Bureau Veritas
- OMI

Estos Códigos de normativas internacionales se muestran con más detalles a continuación:

- El Convenio Marpol se ha consultado debido a que el buque del trabajo es un petrolero y puede transportar sustancias contaminantes, además según el reglamento se considera como un buque nuevo, por lo tanto se aplicara la normativa correspondiente a estos buques, en cuanto a la distribución de los tanques y compartimentos. Concretamente se ha utilizado el Anexo I, y las reglas siguientes: [11]

Capítulo I - Generalidades

i. Regla 1 - Definiciones:

Por buque nuevo se entiende: un buque cuya entrega tenga lugar después del 31 de diciembre de 1979.

Capítulo II - Normas para controlar la contaminación en condiciones de servicio:

- i. Regla 13 - Tanque de lastre separado, tanques dedicados al lastre limpio y limpieza con crudo.
- ii. Regla 13E - Emplazamiento de los espacios destinados a lastre separado como protección.
- iii. Regla 15 - Retención de hidrocarburos a bordo.

Capítulo III - Normas para reducir la contaminación causada por petroleros que sufran daños en los costados o en el fondo.

- i. Regla 24 - Disposición de los tanques de carga y limitación de su capacidad.

- El Convenio SOLAS se ha consultado para la elaboración y distribución de los mamparos. Concretamente estos datos están recogidos en él: [12]

Capítulo II-1 - Construcción - estructura, compartimentado y estabilidad, instalaciones de máquinas e instalaciones eléctricas.

Parte B - Compartimentado y estabilidad.

- i. Regla 11 - Mamparos de los piques y de los espacios de máquinas y, bocinas en los buques de carga.

- En la sociedad de clasificación *Bureau Veritas* sean buscado la normativa que regula la distribución de los mamparos de colisión. [13]

Parte I - *General Hull Requirements*

Chapter II - *General Arrangement Design*

Section II - *Subdivision Arrangement*

Section III - *Compartment Arrangement*

- La normativa de la OMI (*International Maritime Organization*) se ha consultado para analizar los criterios de estabilidad del buque en las diferentes situaciones de carga. Los criterios de estabilidad para buques sin avería aparecen en la: [14]

Resolución A.749(18) - Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI.

Capítulo III - Criterios de estabilidad aplicables a todos los buques.

2.5.- Efectos del oleaje sobre el buque

El buque se desplaza en un medio hostil, el mar. Cuando el buque se encuentra en dicho medio está influenciado por el oleaje, éste responde como si fuera una péndulo de seis grados de libertad. Los movimientos del buque como consecuencia del oleaje consisten en tres desplazamientos y tres rotaciones.[15,16]

El módulo *Motions* que se emplea posteriormente, tiene en cuenta todos los grados de libertad del buque que son los siguientes:

Movimientos de traslación o desplazamiento:

- Heave o arfada. Corresponde al movimiento del buque vertical de ascenso y descenso.
- Sway o deriva. Corresponde al movimiento del buque lateral hacia babor y estribor.
- *Surge*, avance o retroceso. Corresponde al movimiento longitudinal del buque.

Movimientos de rotación:

- *Yaw* o guiñada. Teniendo en cuenta el eje "z", se tiene este movimiento.
- *Pitch* o cabeceo. Teniendo en cuenta el eje "y", se tiene este movimiento.
- *Roll* o balance. Teniendo en cuenta el eje "x", se tiene este movimiento.

Para la realización del estudio de los movimientos del buque en unas condiciones de oleaje determinadas, el modulo *Motions* de **Maxsurf** utiliza función de transferencia ó la RAO (*Response Amplitude Operator*) en español: Operador de Amplitud de Respuesta. [16,17]

Los RAOS ó movimientos en el plano vertical, contribuyen a la espacio libre bajo quilla (*underkeel clearance*) estableciendo los requerimientos de profundidad a causa del oleaje. Respecto a los RAOS en el plano horizontal, se tienen en cuenta para las maniobrabilidad del buque, importante a tener en cuenta por ejemplo cuando se está maniobrando con oleaje en la mar , puertos, canales o ríos. [15,16,17]

3.- OBJETIVOS

Los principales objetivos de este proyecto son los siguientes:

- 1) Analizar la resistencia al avance de un buque petrolero de forma teórica, numérica e informáticamente. Para este último caso, se utilizará el *software* **Maxsurf** y más concretamente el módulo *Resistance*.
- 2) Elección del motor, la hélice y el timón más adecuados para obtener las condiciones de navegación requeridas.
- 3) Elaboración de la distribución y optimización de los espacios de carga del buque, empleando para ello el módulo *Stability* del programa **Maxsurf**.
- 4) Pruebas de estabilidad del buque teniendo en cuenta las diferentes situaciones que se pueden dar, utilizando para ello también el modulo *Stability*.
- 5) Estudio mediante el módulo *Motions* del programa **Maxsurf**, de los movimientos traslación y rotación del buque en una serie de sistemas de olas.

4. ESTUDIO DE LAS FORMAS DEL CASCO

En este apartado se muestran las líneas de agua y cuadernas del buque del proyecto. Este modelo de casco se ha realizado con el módulo *Modeler* de **Maxsurf** y se ha escogido por motivación propia para realizar el proyecto.

En las figuras 5-6 se pueden observar las distintas vistas del buque: alzado, planta y vista de popa. Esta última, es decir el perfil de popa es tipo espejo o *transon stern* ya que, es más sencillo a la hora de construirlo. [1,2]

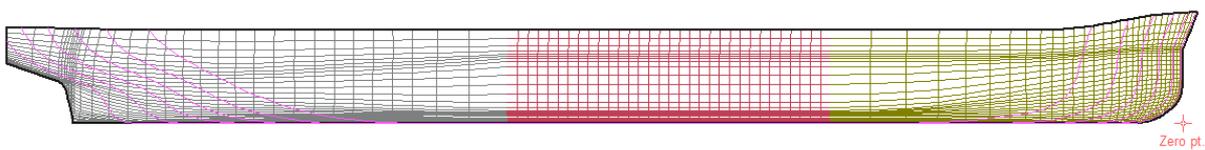


Figura 5. Vista de alzado o costado estribor del buque

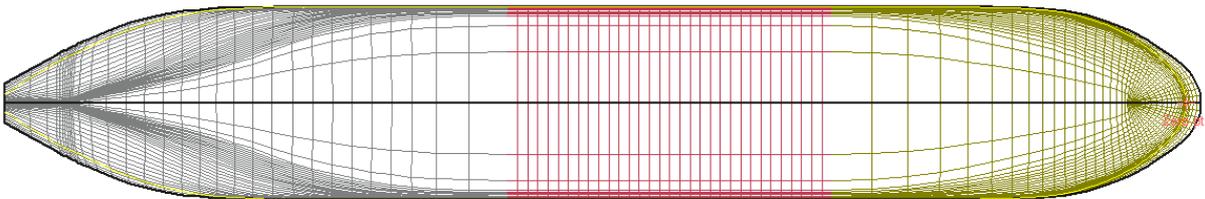


Figura 6. Vista de la planta del buque

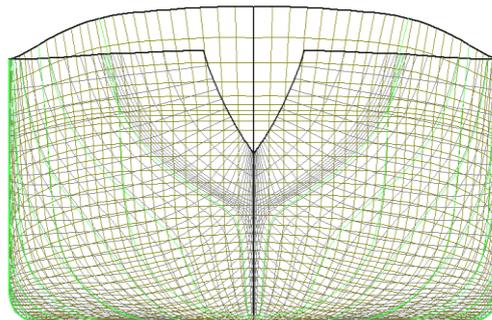


Figura 7. Vista de las formas desde popa del buque

El diseño de este buque se ha llevado a cabo con cuadernas intermedias entre las forma de U y V, con el objetivo de reducir las vibraciones y torbellinos. Además, la construcción de las cuadernas en forma de "U" es más económica [1,18].

Respecto al bulbo de popa suele utilizarse en buques monohélice y rápidos. Generalmente se utiliza para proporcionar un flujo uniforme de agua a la hélice con la finalidad de mejorar el rendimiento propulsivo.[1,18]

Respecto a la proa y en el caso concreto de la elección del bulbo hay que tener en cuenta los calados y trimados, así como las condiciones de carga y lastre que se pudieran dar. [1,19]

Los efectos del bulbo en buques lentos es menos evidente que en los buques rápidos, debido a que es inevitable que el bulbo aumente la superficie mojada y por tanto la resistencia de fricción [1,19].

La función que tiene el bulbo en buque rápidos es reducir la resistencia a la formación de olas, al gastarse menos energía en la formación del sistema de olas.[1,19]

En principio los buques deben llevar bulbo si cumplen las siguientes condiciones [18,19]:

$$\begin{aligned}0,65 < C_b < 0,815 \\ 5,5 < L/B < 7,0\end{aligned}$$

Donde:

L/B = relación manga / eslora

C_b = coeficiente bloque

No se recomienda los bulbos en buques que no cumplen con la ecuación 3:

$$C_b * \frac{B}{L} > 0,135 \quad (8)$$

En el caso del petrolero del proyecto, el $C_b = 0.81$, la relación $L/B = 6,01$ y respecto a $C_b * \frac{B}{L} = 0,132$. Por lo tanto, a pesar de que los valores del coeficientes de bloque y la relación eslora/manga estén dentro del intervalo en el cual cumple la condición para que el buque disponga de bulbo, si es verdad que el valor de $C_b * \frac{B}{L}$, no cumple con el mínimo establecido. Por lo que se ha decidido no incorporar bulbo al buque.

5.- DESARROLLO

En este apartado se emplean los tres módulos del programa de diseño naval **Maxsurf** que se han explicado anteriormente.

En primer lugar se utiliza el módulo *Resistance* para realizar un estudio sobre la resistencia al avance del buque del trabajo.

Posteriormente, se analiza con el módulo *Stability* las diferentes situaciones de carga del buque.

Para terminar el desarrollo del trabajo, mediante el módulo *Motions* se estudian los diferentes movimientos del buque, como rotación y traslación en varios sistemas de oleajes.

5.1. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE

A través del módulo *Resistance* de **Maxsurf** se van a realizar los cálculos de los parámetros más influyentes en la resistencia al avance de la carena.

Las características hidrostáticas del casco al descubierto del petrolero sobre el cual se va a desarrollar el trabajo son las siguientes, ver tabla 1.

Item	valor	Unidad
Displacement	271597	T
Draft at AP	18,16	M
Draft Amidships	18,16	M
Draft at FP	18,16	M
WL Length	330,36	M
Beam max extents on WL	54,254	M
Prismatic coeff. (Cp)	0,818	
Block coeff. (Cb)	0,814	
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,996	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,886	

Tabla 1. Características hidrostáticas principales del buque a estudio.

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

El módulo *Resistance* tiene implementados los siguientes métodos estadísticos para buques de desplazamiento como son:

- Holtrop
- Van Ootmerssen
- Series 60
- Compton
- Fung
- KR Barge Resistance

En la tabla 2, se muestran los resultados de los diferentes métodos elegidos, donde se observa que el buque cumple con todos los parámetros del método *Holtrop*. El resto de los métodos estadísticos implementados en el programa no son adecuados para las características hidrostáticas del buque que se está estudiando, ya que aparecen resaltados en color rojo o naranja, como se puede comprobar en la tabla.

Item	Valor	Unidad	Holtrop	Van Oortmerssen	Seire 60	Compton	Fung
LWL	330	m	330	330	330	330	330
Beam	54	m	54	54	54	54	54
Draft	20	m	20	20	20	20	20
Displaced volume	301256	m ³	301256	301256	301256	301256	301256
Wetted area	26487	m ²	26487	26487	26487	26487	26487
Prismatic coeff. (Cp)	1		1	0,8	--	--	0,8
Waterpl. area coeff. (Cwp)	1		1	--	--	--	--
1/2 angle of entrance	28	deg.	28	28	--	--	28,3
LCG from midships(+ve for'd)	12	m	12	12	--	12	--
Transom area	10	m ²	10	--	--	--	10
Transom wl beam	5	m	--	--	--	--	5
Transom draft	4	m	--	--	--	--	4
Max	1104	m ²	--	1103	--	--	1103

sectional area							
Bulb transverse area	0	m ²	0	--	--	--	0
Bulb height from keel	0	m	0	--	--	--	--
Draft at FP	20	m	20	--	--	--	--
Deadrise at 50% LWL	0	deg.	--	--	--	--	--
Hard chine or Round bilge	Round bilge		--	--	--	Round bilge	--
Correlation allowance	0		Calculate d by method	0	0	0	Fixed at 0.0005

Tabla 2. Métodos empleados en el análisis de la resistencia al avance.

En la figura 8 se puede observar la relación que existe entre la velocidad medida en nudos en el eje de abscisas y la resistencia al avance del buque medida en kilonewtons en el eje de ordenadas, de acuerdo al método Holtrop.

En la gráfica, se puede comprobar que conforme aumenta la velocidad del buque, existe un incremento considerable de la resistencia. A bajas velocidades la resistencia predominante es la de fricción y a altas velocidades la resistencia mayor es la de formación de olas. Concretamente para la velocidad de servicio del buque $V_S = 15$ nudos corresponde una resistencia de $R = 1737$ kN.

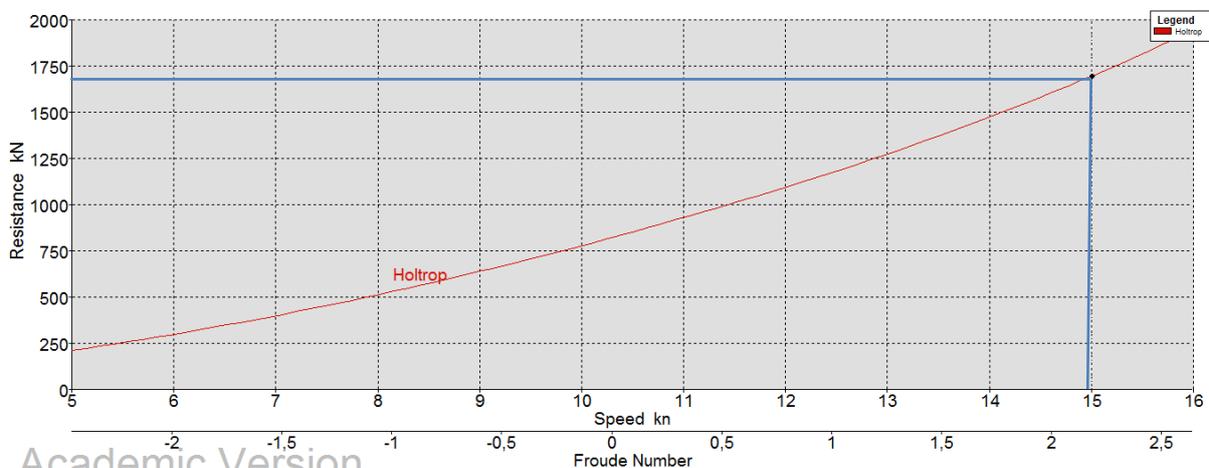


Figura 8. Gráfica relación resistencia al avance del buque - velocidad

A continuación se estudia la estela del buque a la velocidad de servicio. En la opción del menú "Analysis" - "Calculate free surface" - "Speed" se selecciona la velocidad de servicio del buque $V_S = 15$ kn, obteniéndose la estela que se puede observar en la figura 9.

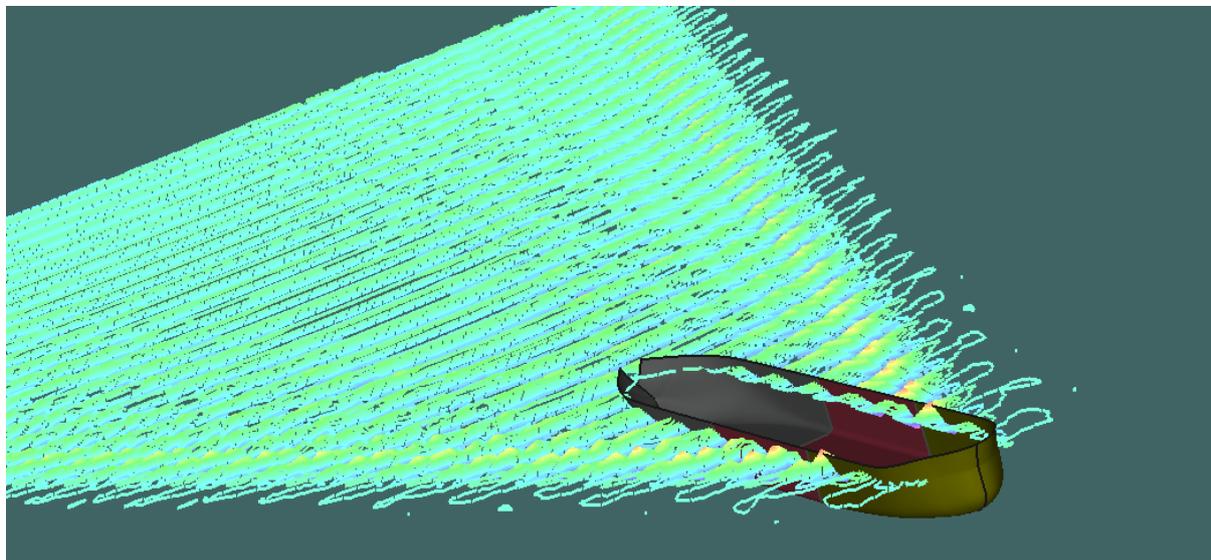


Figura 9. Estela del buque a $V_S = 15$ kn

En la figura 9 se observa el sistema de olas divergentes que van de proa a popa y olas transversales que genera el buque en su desplazamiento a V_s .

Como se puede apreciar las olas transversales ofrecen mayor influencia a la resistencia al avance, además viajan a la misma velocidad que el buque y su longitud de onda es proporcional a la velocidad. La formación de olas exige un gasto de energía, el tamaño de la ola es proporcional a la velocidad del buque.

Otra aspecto que se puede apreciar en la imagen de la estela del buque los remolinos que se generan junto en la popa del buque, estos actúan frenando el buque y, son mayores cuanto menos afinadas son las líneas de buque.

El módulo *Resistance* del programa **MaxSurf** permite también analizar la curva de áreas seccionales. En el eje de abscisas de la gráfica (figura 10) que representa el cuerpo cilíndrico del buque del proyecto, se representa la eslora, la situación de las cuadernas y en las ordenadas el área limitada por la cuaderna correspondiente. Mediante esta curva se puede comprobar si es correcto el plano de formas del buque del proyecto. [1,2]

Longitud del cuerpo de entrada

El buque petrolero a estudio tiene un F_n bajo, es decir, es un buque lento y tendrá un cuerpo de entrada corto y por lo tanto perturbará la superficie del agua considerablemente. Los buques rápidos, tienen un cuerpo de entrada más prolongado y menos vertical. Al cuerpo de entrada le corresponde el 25% de la eslora de buque del proyecto. (véase figura 10) [1,4]

Longitud del cuerpo de salida

Dado que el petrolero es un buque lento. Tiene un cuerpo de salida más largo que el de entrada.

Generalmente la longitud del cuerpo de salida cambia menos, que la longitud del cuerpo de entrada de los buques. Las formas son más finas que las de proa, sobre todo en los tipos de buques en los cuales existe más diferencia, es en los petroleros como es el caso del buque del proyecto. (véase figura 10)

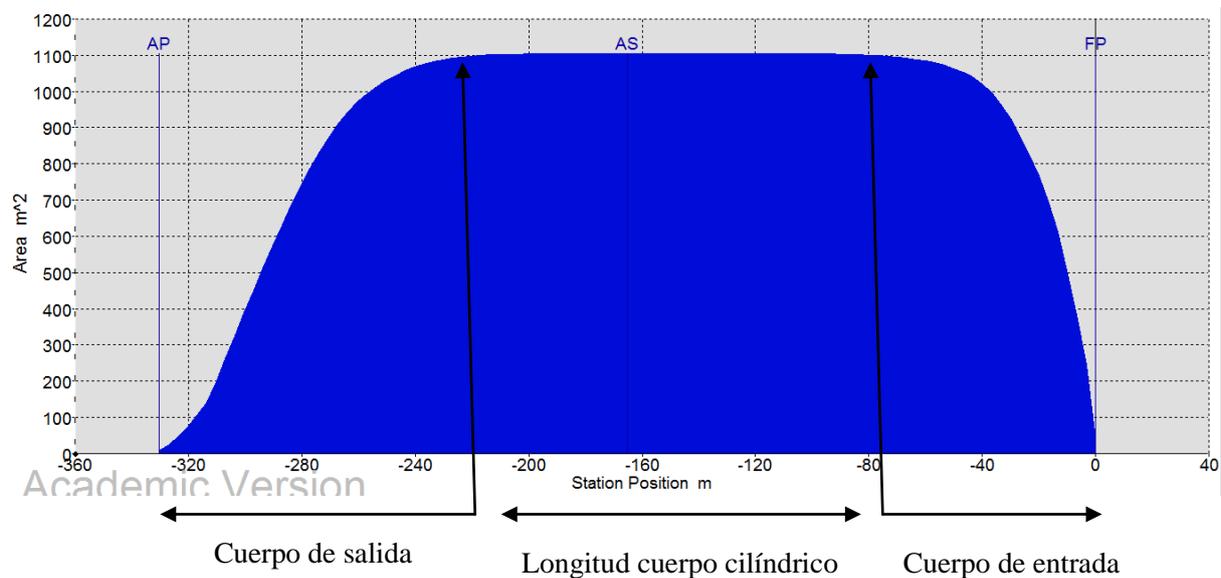


Figura 10. Curva de áreas seccionadas

La curva de áreas de secciones del buque del trabajo corresponde a la figura 10, que a continuación se comenta desde el punto de vista hidrodinámico:

- Se pueden apreciar partes rectas y definidas a proa y popa (cuerpos de entrada y salida respectivamente). Este dato indica que en esas zonas, el volumen varía de forma proporcional.
- Las formas del cuerpo de salida son importantes debido a que dependiendo como sean de finas, producirán más o menos remolinos que frenaran al buque.
- Si el petrolero llevará bulbo, en la zona de proa la curva debería de tener concavidad acusada, sin embargo, no se aprecia en el caso del petrolero a estudio.[3]

5.2. CÁLCULO DE LA UNIDAD PROPULSORA DEL BUQUE

En este apartado se realiza el cálculo de la potencia necesaria para satisfacer la velocidad de servicio del buque ($V_s = 15$ nudos) y en función de la misma se selecciona el motor, la hélice y el timón necesarios.

5.2.1. Potencia total

Para hallar la potencia propulsora ó de freno, en inglés conocida como (BHP) *Brake Horse Power*, se debe de hallar previamente la potencia efectiva (P_E ó EHP) *Effective Horse Power* y el rendimiento propulsivo (η_p).[20,21]

La potencia efectiva del buque se obtendrá a través del método *Holtrop* del programa **Maxsurf**, como se muestra en la gráfica de la figura 11, que relaciona la potencia efectiva del motor con la velocidad.

En la tabla 3 obtenida del programa, se pueden apreciar la relación que existe entre: velocidades medidas en nudos (kn), resistencia en kilonewtons (kN) y potencia en kilovatios (kW). Podemos comprobar que para una velocidad de servicio del buque del proyecto de $V_s = 15$ nudos le corresponde una potencia efectiva de $P_E = 13560,57$ kilovatios, que equivalen a 18185 HP. Estos datos están subrayados en amarillo para que sean fácilmente localizables.

Speed (kn)	Holtrop Resistance (kN)	Holtrop Power (kW)
5	212,4	546,454
5,275	234,9	637,418
5,55	258,4	737,714
5,825	282,9	847,762
6,1	308,5	967,978
6,375	335	1098,775
6,65	362,6	1240,564
6,925	391,2	1393,75
7,2	420,8	1558,736
7,475	451,4	1735,925
7,75	483	1925,713
8,025	515,6	2128,498
8,3	549,1	2344,672
8,575	583,6	2574,629
8,85	619,1	2818,761
9,125	655,6	3077,462
9,4	693	3351,127
9,675	731,4	3640,156
9,95	770,7	3944,955
10,225	811	4265,94
10,5	852,2	4603,54
10,775	894,5	4958,2
11,05	937,7	5330,39
11,325	981,9	5720,605
11,6	1027,1	6129,377
11,875	1073,4	6557,277
12,15	1120,7	7004,928
12,425	1169,1	7473,009
12,7	1218,7	7962,269
12,975	1269,5	8473,534
13,25	1321,7	9009,17
13,525	1376	9574,339
13,8	1431,9	10165,438
14,075	1489,3	10783,771
14,35	1548,4	11430,777
14,625	1609,3	12108,047
14,9	1672,1	12817,335
15,175	1737	13560,57
15,45	1804,2	14339,869
15,725	1873,7	15157,552

16	1945,8	16016,149
----	--------	-----------

Tabla 3. Datos de resistencia y potencia efectiva del buque a distintas velocidades según el método *Holtrop*

En la siguiente gráfica (figura 11) se representan los valores de la tabla 3, el eje de abscisas corresponde a la potencia efectiva y el eje de coordenadas corresponde a la velocidad. Concretamente la línea azul muestra la potencia que corresponde a la velocidad de crucero del buque.

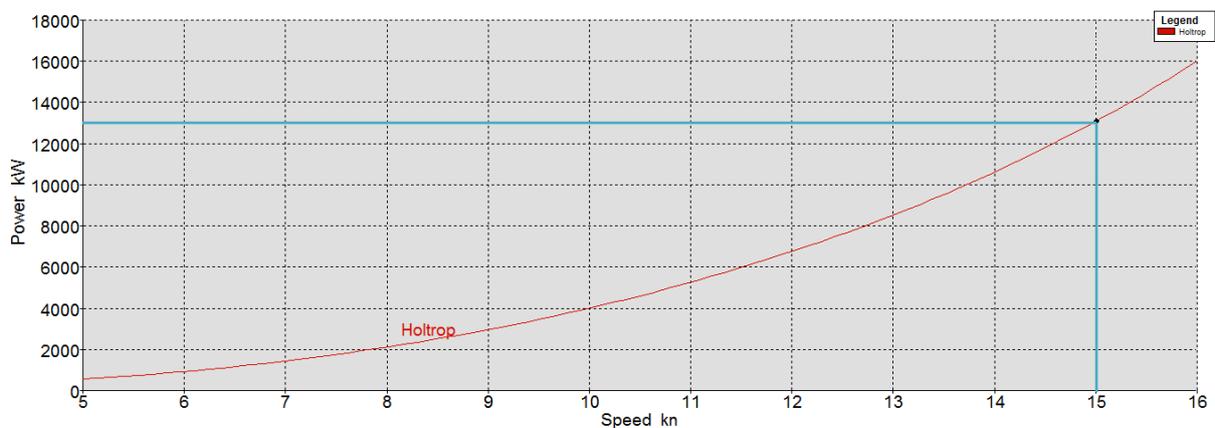


Figura 11. Gráfica potencia efectiva - velocidad

Tras haber determinado la P_E se procede al cálculo de la potencia propulsora del motor propulsor. [20,21]

$$P_B = \frac{P_E}{\eta_p} \quad (9)$$

$$\eta_p = \eta_H * \eta_M * \eta_o * \eta_R \quad (10)$$

Donde,

η_p = Rendimiento propulsivo

η_H = Rendimiento del casco

η_M = Rendimiento mecánico línea de ejes

η_o = Rendimiento del propulsor aislado

η_R = Rendimiento rotativo relativo

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (11)$$

Donde;

$t = Thrust deduction$ o variación del empuje

Para el buque del proyecto que dispone de una sola hélice, el valor se encuentra entre 0,12 - 0,3, por lo tanto se opta por tomar un valor aproximado de 0,21.[20,21,22]

$w = Wake gain$ o coeficiente de estela

El coeficiente de estela para buques de una sola hélice oscila entre 0,25 - 0,45, por lo tanto se tomará un valor aproximado de 0,35.[20,21,22]

Para η_M se tomará un valor de 0,98, que es el valor estimado.[20,21,22]

El η_o suele variar entre 0,60 - 0,75, el valor aproximado en este caso se estima en 0,7.[20,21,22]

El η_R para el buque se encuentra en un intervalo de entre 1 - 1,07 , por lo tanto se tomará un valor intermedio aproximado de 1,04.[20,21,22]

Una vez determinados los coeficientes, previamente al cálculo del rendimiento propulsivo η_P , se calcula el rendimiento del casco η_H

$$\eta_H = \frac{1 - 0,21}{1 - 0,35} = 1,21$$

$$\eta_P = 1,21 * 0,98 * 0,7 * 1,04 = 0,86$$

Después de haber concluido el cálculo de los coeficientes anteriores, se procede a la determinar la potencia del motor principal del buque del proyecto. [20,21,22]

$$P_B = \frac{P_E}{\eta_P} = \frac{18185}{0,86} = 21145 \text{ HP.}$$

A esta potencia obtenida se añadirá un margen de mar o *sea margin* del 15% y un margen de motor del 85% del MCR (*Máximum Continuous Rate*).[20,21,22]

Por lo tanto, la potencia del motor propulsor necesario es de:

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_p \cdot MCR} \cdot SeaMargin = \frac{18185}{0,86 \cdot 0,85} \cdot 1,15 = 28608 \text{ HP} \quad (12)$$

Una vez se ha determinado la potencia propulsora necesaria, se procede a la elección de la máquina de entre los fabricantes de motores marinos. MAN Marine Engines [23], ofrece un motor con las características similares a la potencia estimada del buque. Por ello se opta por el motor MAN B&W, modelo S70 MC - C7 de $P_B = 29194 \text{ HP}$ (figura 12) que ofrece una potencia superior a la calculada anteriormente $P_B = 28608 \text{ HP}$.

MAN B&W S70 MC - C7			
Nº CILINDROS	RPM	CONSUMO 100% POTENCIA	PESO Tn
7	91	169gr/Kwh	624

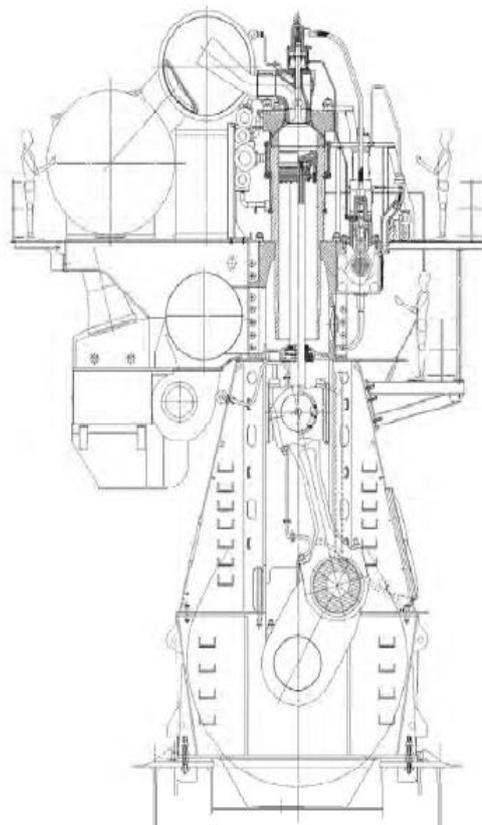


Figura 12. Motor propulsor del buque. [23]

5.2.2 Determinación del diámetro ideal de la hélice.

Para llevar a cabo la determinación de las características de la hélice se debe analizar la forma de la popa, así como los huelgos entre la hélice y la carena (figuras 16 y 17 o las que correspondan).

La sociedad de clasificación *Lloyd's Register*, obliga a que el buque disponga de unos espacios establecidos entre el timón, el casco y la hélice. El objetivo es determinar la hélice que aporte mejor rendimiento al buque del proyecto [24].

Table 6.7.5 Recommended propeller/hull clearances

Number of blades	Hull clearances for single screw, in metres, see Fig. 6.7.7(a)				Hull clearances for twin screw, in metres, see Fig. 6.7.7(b)	
	a	b	c	d	e	f
3	1,20Kδ	1,80Kδ	0,12δ	0,03δ	1,20Kδ	1,20Kδ
4	1,00Kδ	1,50Kδ	0,12δ	0,03δ	1,00Kδ	1,20Kδ
5	0,85Kδ	1,275Kδ	0,12δ	0,03δ	0,85Kδ	0,85Kδ
6	0,75Kδ	1,125Kδ	0,12δ	0,03δ	0,75Kδ	0,75Kδ
Minimum value	0,10δ	0,15δ	t _R	—	3 and 4 blades, 0,20δ 5 and 6 blades, 0,16δ	0,15δ
Symbols						
L as defined in 1.4.1			t _R = thickness of rudder, in metres, measured at 0,7R _p above the shaft centreline			
C _b = moulded block coefficient at load draught			P = designed power on one shaft, in kW (shp)			
$K = \left(0,1 + \frac{L}{3050}\right) \left(\frac{3,48C_b P}{L^2} + 0,3\right)$			R _p = propeller radius, in metres			
$\left(K = \left(0,1 + \frac{L}{3050}\right) \left(\frac{2,56C_b P}{L^2} + 0,3\right)\right)$			δ = propeller diameter, in metres			
NOTE The above recommended minimum clearances also apply to semi-spade type rudders.						

Figura 13. Medidas de los huelgos de las hélices [25]

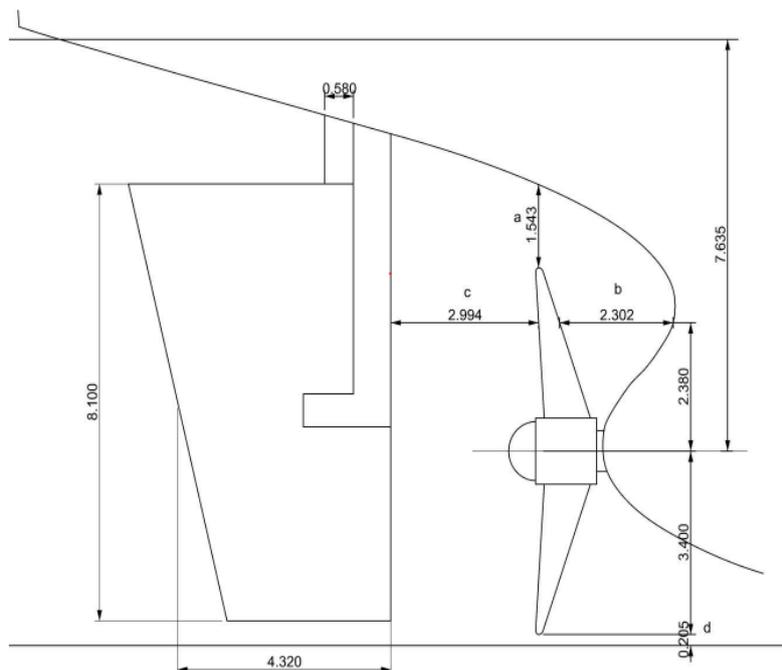


Figura 14. Especificaciones dimensionales de *Lloyd's Register* [24]

El valor de mayor relevancia de los huelgos que aparecen en la figura 14 es el "d", que corresponde a la distancia del extremo del diámetro de la hélice y la línea base. En general, esta distancia no debe superar el 3% del diámetro de la hélice.[19,24]

De acuerdo con la normativa de *Lloyd's Register*, el número de palas para las hélices de buques con estas características oscila entre 4 y 5, en el caso del buque a estudio, corresponderá a cuatro debido a que una hélice de cinco palas tendría un presupuesto más elevado y siendo que el número de cilindros es impar, entonces el número de palas debe ser par para evitar problemas de vibraciones. Los cálculos necesarios para la determinación de las características de la hélice, acorde con la normativa para los buques de una hélice son los siguiente:[19,24]

$$\text{Diameter of propeller } DP = 15,75 \frac{MCO^{0,2}}{N^{0,6}} = 8,22 \text{ m} \quad (13)$$

Donde,

$$a = Kz * K * DP$$

$$b = 1,5a$$

$$c = 0,12DP$$

$$d = 0,03DP$$

$$Kz = 1$$

$$\text{Maximum continuous output (MCO)} = 29194 \text{ Hp}$$

$$N = \text{r.p.m}$$

$$K = 0,1 + \frac{L}{3050} * 2,56 * Cb * \frac{MCO}{L^2} + 0,3 = 0,18 \quad (14)$$

Espacios	Lloyd's Register
A	1,47
B	2,2
C	0,98
D	0,24

Tabla 4. Determinación de los espacios relacionados con el timón, hélice y casco.

5.2.3. Elección del timón

El timón seleccionado debe proporcionar la maniobrabilidad adecuada, es decir, se tendrá en cuenta la capacidad de evolución, estabilidad de ruta, facilidad de cambio de rumbo.[25]

Se calculan las medidas de este elemento mediante una serie de ecuaciones de la sociedad de clasificación noruega *Det Norske Veritas* [26], como se muestra en la ecuación 15.

Determinación del área del timón

$$AR = 0,01 * L_{pp} * T * \left(1 + 50Cb^2 * \frac{B}{L_{pp}} \right)^2 = 132 \text{ m}^2 \quad (15)$$

Cálculo de la compensación del timón

La parte que se encuentra a proa del eje de giro del timón, debe de estar entre los intervalos del 20% al 35% del total del área.[25,26]

Por lo tanto,

$$\text{Área compensada del timón } A_c = 0,2 * AR = 26,4 \text{ m}^2$$

Cálculo de la longitud a proa eje de giro del timón

Respecto la altura de este elemento, se tomará una altura estimada de 12 m de forma que la pala se encuentre en el chorro de la hélice. [25,26]

Para hallar esta longitud, se debe determinar previamente la longitud del timón mediante la ecuación: [25,26]

$$\text{Longitud del timón} = \frac{\text{Área timón}}{\text{Altura timón}} = 11 \text{ m}$$

$$\text{Longitud a proa del eje de giro del timón} = 0,35 * \text{Longitud timón} = 3,85 \text{ m}$$

5.3. ESTUDIO DE ESTABILIDAD DEL BUQUE

A través del módulo *Stability* de **Maxsurf** se realizará la compartimentación, distribución y optimización de los espacios del buque, mediante unos cálculos previos siguiendo las normativas internacionales sobre petroleros.

Posteriormente se realizan diferentes análisis de estabilidad, en diferentes situaciones de carga, generando curvas y tablas hidrostáticas las cuales nos permitan determinar si el buque cumple con los criterios de estabilidad antes de la salida del puerto.

5.3.1. Cálculo de peso en rosca y centro de gravedad

En este apartado se establecerá el peso en rosca y el centro de gravedad del buque del trabajo.

Criterios seguidos para realizar los cálculos:

- Para la determinación del peso de la estructura de acero se utiliza el método Sv.Aa. Harvald y J.Juncher [19] y se emplean las ecuaciones recomendadas por la *Lloyd's Register*.
- Para elaborar el peso que compone el equipo y la habilitación se emplean también las ecuaciones recomendadas por la *Lloyd's Register*, excepto para la habilitación.
- El peso de la maquinaria se determina también siguiendo las pautas de la *Lloyd's Register*.

El dato del peso del motor lo obtendremos mediante las especificaciones del fabricante MAN B&W.

Previamente a la compartimentación, se realizan los cálculos numéricos necesarios, tal y como se ha establecido anteriormente, es decir, se siguen los siguientes pasos:

1) Peso de la estructura de acero de petroleros.

Los cálculos realizados son una aproximación, ya que los valores se obtienen mediante las características principales del buque.

Ecuaciones de Sv.Aa. Harvald & J.Juncher

$C_{s0} = 0,0752$ valor correspondiente a buques petroleros.

DISW (Desplazamiento del buque en condiciones de máxima carga) = 271584 Tn

$$\text{Coeficiente } C_s = C_{s0} + 0,064 * e^{-0,5 * \log \frac{DISW}{100} - 0,1 * \log \frac{DISW}{100}^{2,45}} = 0,0767 \quad (16)$$

$$\text{Sup} = 0,8 * B * 1,45 * L_{pp} - 11 = 19882,8 \text{ m}^3 \quad (17)$$

Sup = Volumen en m³ de superestructuras y casetas

$$\text{WST} = C_s * L_{pp} * B * D + \text{Sup} = 35177,13 \text{ Tn peso estructura I} \quad (18)$$

WST = Peso de la estructura

Procedimiento para buques petroleros con doble casco

Para este cálculo aproximado se emplearán de nuevo las características principales del buque del trabajo y el porcentaje de acero comúnmente empleado en la construcción de petroleros denominado HT. [4,19]

En este cálculo se incluyen tanto superestructuras y casetas, como se muestra en ecuación 21.

$$\text{WST} = 0,0658 * L_{pp}^{1,7} * B^{0,102} * D^{0,886} = 31893,86 \text{ Tn peso estructura II} \quad (19)$$

Finalmente tomaremos el valor del segundo método como peso de la estructura.

2) Peso de los equipos y de la habilitación

Dentro de este apartado están incluidos elementos como:

- Equipos empleados en la carga
- Equipos de navegación y gobierno
- Equipo de contraincendios y salvamento

Mediante la expresión siguiente se halla el valor de dichos pesos: [4,18]

Primero se determina el coeficiente (k_e)

$$k_e = 0,36 - 0,53 * 10^{-3} * L_{pp} = 0,1877 \quad (20)$$

$$WOA = k_e * L_{pp} * B = 3294,1 \text{ Tn} \quad (21)$$

3) Peso de la maquinaria propulsora y auxiliar

El cálculo aproximado se halla teniendo en cuenta los siguientes parámetros: características principales del buque, tipo de motor principal, revoluciones y potencia necesaria.

Peso del motor principal

En este caso el peso del motor propulsor es de $WME = 624 \text{ Tn}$, con sus respectivos líquidos internos. [4,18]

Peso del resto de la maquinaria propulsora, véase ecuación 22.

K_m para petroleros = 0,59

Maximum continuous output (MCO) = 29194 HP

$$WRP = K_m * MCO^{0,7} = 788,05 \text{ Tn} \quad (22)$$

WRP = Peso del resto de la maquinaria propulsora [3,4]

Peso de otros elementos de la sala de máquinas, véase ecuación 26.

$$VMQ = 0,85 * L_{cm} * B * D * \left(3,27 * \frac{L_{cm}}{L_{pp}} - 0,0655 \right) = 7539,18 \text{ m}^3 \quad (23)$$

Volumen cámara máquinas = VMQ

Lcm = Longitud cámara de máquinas

$$WQR = 0,03 * VMQ = 226,18 \text{ Tn} \quad (24)$$

WQR = Peso de otros elementos de la cámara de máquinas [3,4]

Peso de la línea ejes

Kne = 1, para buques con una sola línea de ejes.

L_{eje} = longitud pique de popa más dos metros, por lo tanto, 13 + 2 = 15 m

$$WQE = k_{ne} + L_{eje} \cdot 5 + 0,0164 * L_{pp} = 155,95 \text{ Tn} \quad (25)$$

WQE = Peso de la línea de ejes

Peso total de la maquinaria del buque del trabajo

Total peso de la maquinaria (WQ) [3,4]

$$WQ = WQE + WQR + WRP + WNE = 1794,18 \text{ Tn} \quad (26)$$

4) Determinación del centro de gravedad del buque en rosca

Se considera buque en rosca aquel que está vacío, es decir, como sale del astillero, sin provisiones, pertrechos, tripulación y sin agua ni combustible. El centro de gravedad (c.d.g.) es el punto del buque en el cual se considera que actúa el peso total de éste. A continuación se calcula de forma aproximada el centro de gravedad:

1.- Centro de gravedad del armazón del casco

En el cálculo siguiente se tendrá en cuenta las dimensiones principales del casco del buque del proyecto.

Para hallar el centro de gravedad del armazón se empieza calculando el coeficiente de bloque a nivel de cubierta superior (CBD)

$$CBD = C_b + 0,35 * \frac{D - T}{T} - 1 - C_b = 0,83 \quad (27)$$

Seguidamente se realiza la operación $\frac{L_{pp}}{B} = 6,01$ y, siendo que $\frac{L_{pp}}{B} \neq 6,5$, se aplica una corrección equivalente a $+ 0,8\% * D$ con la que se obtendrá el (DA), que es el puntal medio corregido por arrufo y por volumen de escotillas. [4,18]

$$DA = D + 0,8\%D = 25,2 \text{ m} \quad (28)$$

Finalmente se empleará la ecuación 30 para hallar el valor del centro de gravedad de la estructura de acero en % del puntal.

$$KGWST = 48 + 0,15 * 0,85 - CBD * \frac{L_{pp}^2}{D^2} * \frac{DA}{D} = 48,89\%, 12,22 \text{ m} \quad (29)$$

2.- Centro de gravedad del equipo y la habitación

Para determinar este valor utilizaremos la ecuación 31 recomendada para buques de L_{pp} superior a 250 m. [18,19]

$$KGWOA = D + 2,5 = 27,5 \text{ m} \quad (30)$$

3.- Centro de gravedad de la maquinaria

Se halla a través de la ecuación siguiente [18,19]

$$KGWQ = 0,17 * T + 0,35 * D = 11,84 \text{ m} \quad (31)$$

5) Peso del buque en rosca y su centro de gravedad.

- El valor del peso del buque en rosca (WR) es la suma de [18,19]:

$$WR = WOA + WST + WQ \quad (32)$$

Donde,

WOA = Equipo y habilitación

WST = Estructura

WQ = Maquinaria

$$WR = 36982 \text{ Tn}$$

- El centro de gravedad buque en rosca se halla por medio de la siguiente ecuación:

$$KGWR = \frac{WST * KGWST + WOA * KGWOA + WQ * KGWQ}{WST + WOA + WQ} = 13,56 \text{ m.} \quad (33)$$

5.2.2. Compartimentado del buque

Para realizar la distribución de los tanques y compartimentos del buque se deben realizar una serie de cálculos previos que permiten optimizar al máximo los espacios del casco del buque del trabajo.

El compartimentado se realiza con el módulo *Stability* de **Maxsurf** y, conforme a la normativa de *Bureau Veritas* y *Lloyd's* que a su vez, coinciden con el convenio SOLAS y Marpol.

1) Pique de popa

Generalmente las sociedades de clasificación no exigen que el mamparo de popa, el cual limita la longitud del pique o *peak* de popa, esté situado a una longitud concreta, aunque la distancia se suele calcular mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Longitud pique popa} = 0,04 * L_{pp} = 13 \text{ m} \quad (34)$$

La posición en general se determina por motivos de lastre o espacio de la sala de máquinas.

En las figuras siguientes se puede observar la elaboración del compartimentado del pique o peak de popa.

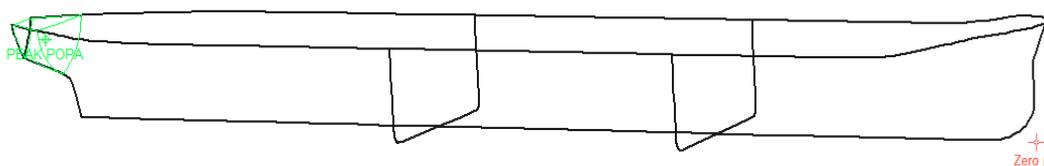


Figura 15. Vista en 3D del pique o peak de popa

Siguiendo con la distribución de los espacios, a continuación se expone la normativa que regula las divisiones de los mamparos.

EL Convenio SOLAS regula la posición de los mamparos en el Capítulo II-1 "Construcción - estructura, compartimentado y estabilidad, instalaciones de máquinas e instalaciones eléctricas", Parte B "Compartimentado y estabilidad", Regla 11 "Mamparos de los piques y de los espacios de máquinas y, bocinas en los buques de carga" que indica:

"Se instalarán mamparos estancos hasta la cubierta de francobordo que separen a proa y a popa el espacio de máquinas del espacio de carga y de pasajeros".

Respecto a la normativa que se ocupa de los tanques de lastre, doble fondo o laterales para petroleros es el Marpol 73/78. En el Anexo I, la Regla 13F, que legisla la prevención por hidrocarburos en casos de abordaje o varada, en el apartado d) capacidad total de los tanques de lastre indica:

"En los petroleros para crudos de peso muerto igual o superior a 20.000 Tn y en petroleros para productos de peso muerto igual o superior a 30.000 Tn, la capacidad total de los tanques laterales, tanques del doble fondo y tanques de los piques de proa

y popa no será inferior a la capacidad de los tanques de lastres separados de los tanques de carga necesaria para cumplir lo prescrito en la regla 13".

En referencia a la Regla 13 establece:

"La capacidad de los tanques de lastre separado de los tanques de carga, se determinará de modo que el buque pueda operar con seguridad durante los viajes en lastre sin tener que recurrir a la utilización de los tanques de carga, salvo que las circunstancias lo requieran".

La Sociedad de Clasificación *Bureau Veritas* en la Parte I - *General Hull Requirements, Chapter II - General Arrangement Design, Section II - Subdivision Arrangement*, considera que todos los buques deben de disponer de tres mamparos transversales. En el caso del buque del proyecto, además de los mamparos trasversales indicados en la figura, llevará seis adicionales y uno longitudinal.

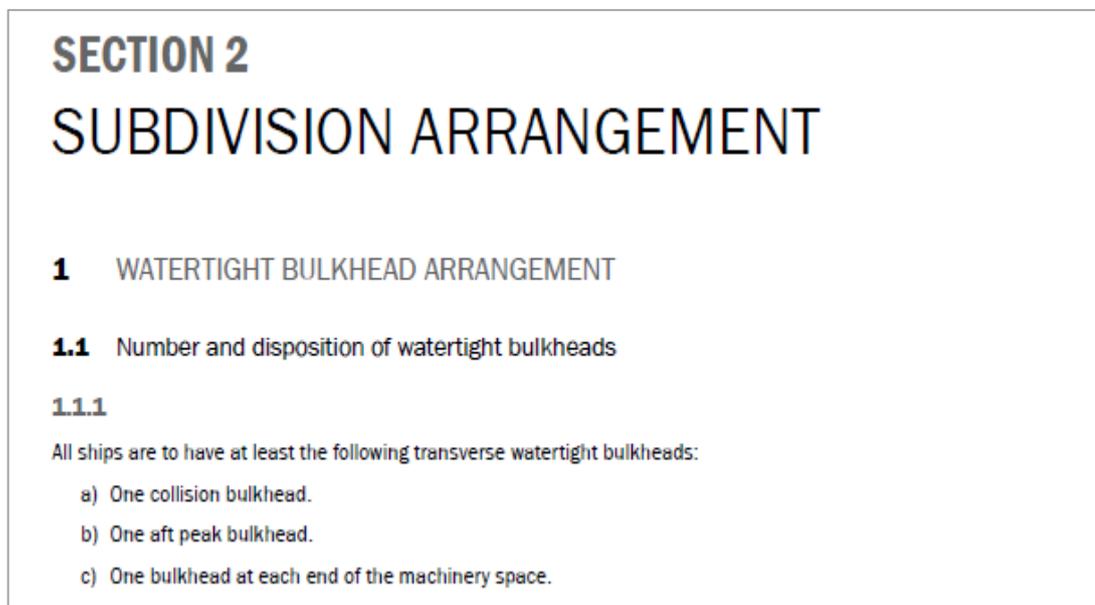


Figura 16. Normativa de mamparos *Bureau Veritas* [13]

En las ilustraciones siguientes se muestran los mamparos distribuidos en el casco del buque del trabajo.

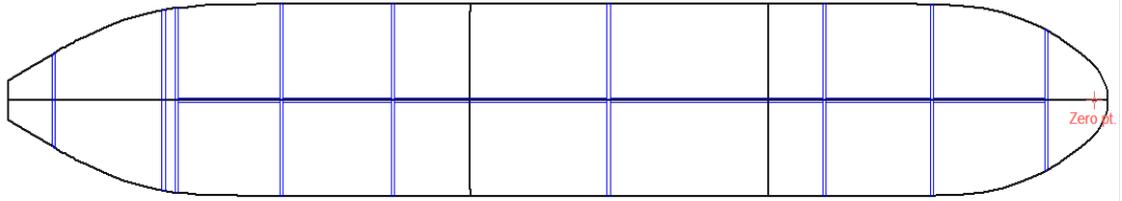


Figura 17. Vista superior distribución mamparos transversales y longitudinales

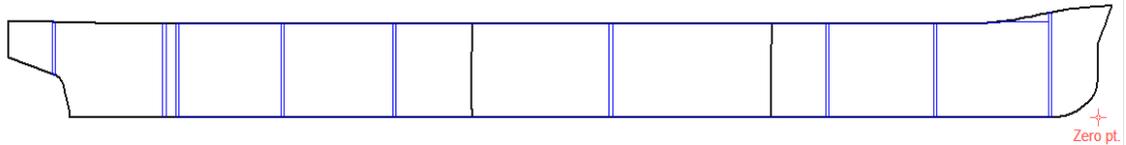


Figura 18. Vista costado estribor distribución mamparos transversales y longitudinales

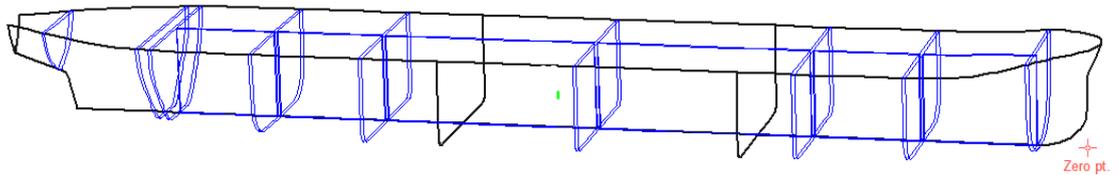


Figura 19. Vista mamparos transversales y longitudinales en 3D

2) Pique proa

El pique de proa está limitado por el mamparo estanco de proa, por lo que a continuación se expone la normativa del mamparo de proa.

EL Convenio SOLAS regula la posición de los mamparos en el Capítulo II-1 "Construcción - estructura, compartimentado y estabilidad, instalaciones de máquinas e instalaciones eléctricas", Parte B "Compartimentado y estabilidad", Regla 11 "Mamparos de los piques y de los espacios de máquinas y, bocinas en los buques de carga" dice:

"Se instalará un mamparo de colisión que será estanco hasta la cubierta de francobordo. Este mamparo estará situado a una distancia de la perpendicular de proa no inferior al 5% de la eslora del buque o a 10 m si esta segunda magnitud es menor y, salvo cuando la Administración permita otra cosa, dicha distancia no será superior al 8% de la eslora del buque".

$$Lfp_{\min} = 10 \text{ m}$$
$$Lfp_{\max} = 0,08 * Lpp = 26 \text{ m}$$

Finalmente en la figura siguiente se muestra la distribución del pique de proa.

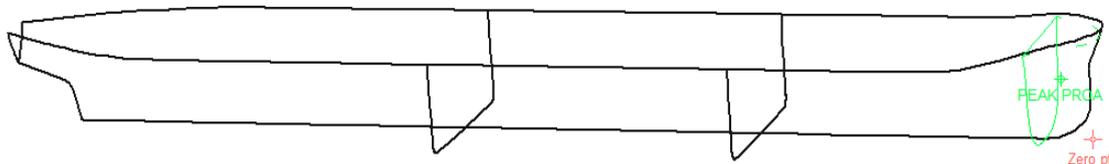


Figura 20. Vista 3D del pique o *peak* de proa

3) Doble fondo

Respecto al doble fondo, varios son los reglamentos que regulan este área del buque, pero los reglamentos no pueden contradecirse entre sí.

Por ejemplo el Convenio Marpol establece en la Regla 13 - Tanque de lastre separado, tanques dedicados al lastre limpio y limpieza con crudo, del Capítulo II - Normas para controlar la contaminación en condiciones de servicio, del Anexo I - Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos, lo siguiente:

- a) "Todo tanque o espacios laterales cuya profundidad sea igual a la altura del costado del buque, o que se extienda desde la cubierta hasta la cara superior del doble, tendrá una anchura mínima no inferior a 2 m. Esta anchura se medirá desde el costado hacia el interior del buque perpendicularmente al eje longitudinal de este."
- b) "La profundidad mínima de todo tanque o espacio de doble fondo será de $B/15$ ó 2 m, si este valor es inferior."

Además, respecto a la capacidad de los tanques del lastre de doble fondo, tanques laterales y pique de proa y popa. La Regla 13 - Tanques de lastre separado, tanques dedicados a lastre limpio y limpieza con crudos establece:

- 2) "La capacidad de los tanques de lastre separado se determinará de modo que el buque pueda operar con seguridad durante los viajes en lastre sin tener que recurrir a

la utilización de los tanques de carga para lastrar con agua, salvo por lo que respecta a lo dispuesto en los párrafos 3) ó 4) de la presente regla. No obstante la capacidad mínima de los tanques de lastre separado permitirá en cualquier caso que, en todas las condiciones de lastre que puedan darse en cualquier parte del viaje, incluida la condición de buque vacío con lastre separado únicamente, puedan ser satisfechas cada una de las siguientes prescripciones relativas a los calados y asientos";

- a) "El calado de trazado en el centro del buque (dm), expresado en metros (sin tener en cuenta las deformaciones del buque), no será inferior a dm: $dm = 2,0 + 0,02L$ ".
- b) "Los calados en las perpendiculares de proa y popa corresponderán a los determinados por el calado en el centro del buque (dm), tal como especifica en el apartado a) del presente párrafo, con un asiento apopante no superior a 0,015L.
- c) "En cualquier caso, el calado en la perpendicular de popa no será nunca inferior al necesario para garantizar la inmersión total de la (s) hélice (s)".

En el caso del buque el calado de trazado corresponde a $D= 18,16$ m

También la Sociedad de Clasificación *Bureau Veritas* establece en el *Chapter II - General Arrangement Design, Section III - Compartment Arrangement* lo siguiente:

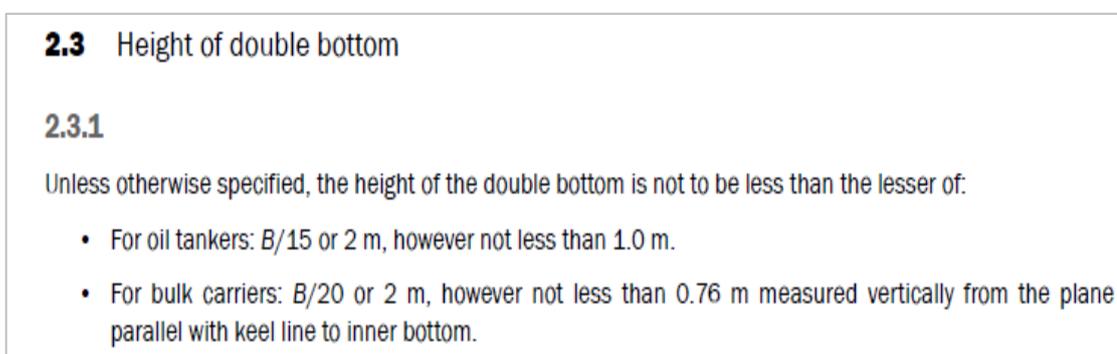


Figura 21. Normativa doble fondo *Bureau Veritas* [13]

Una vez establecida la normativa que regula el doble fondo del buque del proyecto, se muestran una serie de ilustraciones sobre su distribución a través del módulo de

Stability de **Maxsurf**. En las zonas donde hay una separación entre los tanques de doble fondo, corresponde un mamparo transversal o longitudinal.

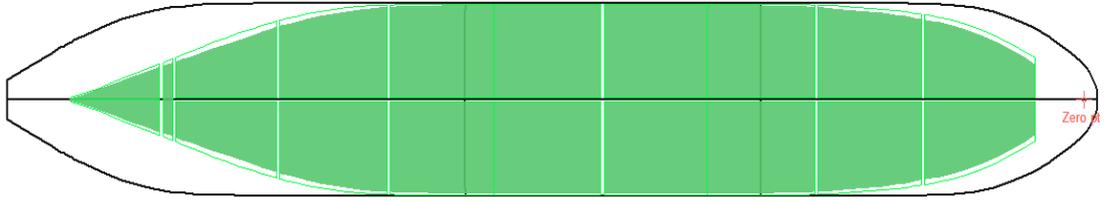


Figura 22. Vista superior de los doubles fondos

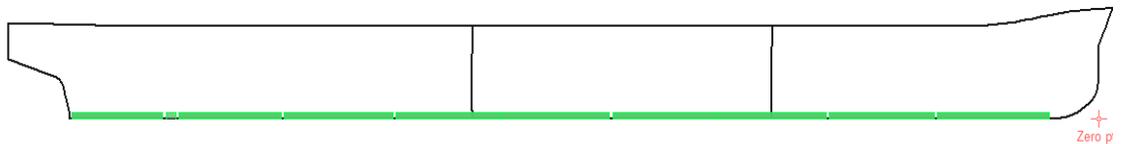


Figura 23. Vista del costado de estribor de los doubles fondos

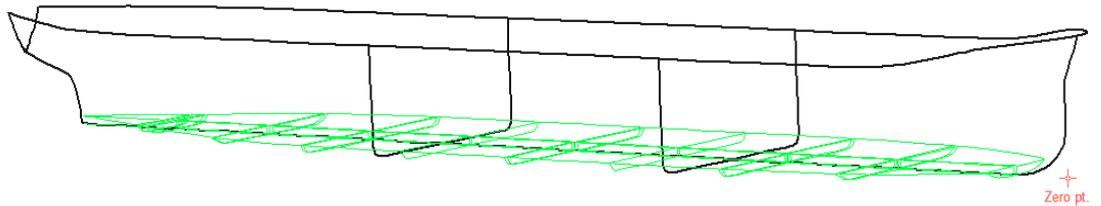


Figura 24. Vista en 3D doble fondo

La profundidad de cada doble fondo cumplirá con la siguiente expresión:

En el caso del buque del proyecto $\frac{B}{15} = 3,6$ m.

Pero finalmente tomará el valor de 2 m para aprovechar al máximo el espacio de carga.

4) Doble casco

El doble casco, es decir, los tanques de lastre laterales envuelven los tanques de carga protegiendo la carga y evitando derrames de hidrocarburos. Al igual que los tanques de doble fondo que también evitan posibles derrames en caso de varada, etc.

El doble casco está regulado también por diferentes normativas, por ejemplo:

- La OPA (*Oil pollution Act*) fundada en 1990 en EE.UU regula los derrames de hidrocarburos.
- Marpol 73/78, Anexo I - Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos, Capítulo II - Normas para controlar la contaminación en condiciones de servicio, Regla 13E - Emplazamiento de los espacios destinados a lastre separado como protección.
- La Sociedad de Clasificación *Bureau Veritas* en el *Chapter II - General Arrangement Design, Section III - Compartment Arrangement* contempla en su reglamento lo siguiente:

3 DOUBLE SIDE

3.1 Double side width

3.1.1 Oil tankers

The minimum double side width, W_{ds} , in m, is to be taken as the lesser of:

$$W_{ds} = 0.5 + \frac{DWT}{20000} \text{ but not less than } 1.0$$
$$W_{ds} = 2.0$$

Figura 25. Normativa doble casco *Bureau Veritas* [13]

En el caso del buque de trabajo, se optará por $W_{ds} = 2$ m para aprovechar al máximo el espacio de carga.

Donde,

W_{ds} = double side width

5) Tanques de decantación o *slops*

Se considera *slop*, a todo tanque que esté específicamente destinado a recoger residuos y aguas de lavados de tanques, y otras mezclas oleosas. Así lo define la Regla 1 - Definiciones, Capítulo I - Generalidades, del Anexo I, del Marpol 73/78.

El código que regula estos tanques es el Marpol 73/78, Anexo I - Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos, Capítulo II - Normas para controlar la contaminación en condiciones de servicio, Regla 15 - Retención de hidrocarburos a bordo, que dice:

c) "La disposición del tanque o de la combinación del tanques de decantación será tal que tenga capacidad suficiente para retener las lavazas generadas por el lavado de tanques, los residuos de hidrocarburos y los del lastre contaminado. La capacidad total del tanque o de la combinación de tanques de decantación no será inferior al 3% de la capacidad de transporte de hidrocarburos del buque, si bien la administración podrá aceptar":

1. "El 2% para los petroleros en que la disposición del lavado de tanques sea tal que, una vez que el tanque o los tanques de decantación hayan sido cargados con agua de lavado, ésta baste para el lavado de los tanques y, cuando sea ello aplicable, para proveer el fluido motriz destinado a los aductores, sin introducir agua adicional en el sistema";
2. "El 2% cuando existan tanques de lastre separado o tanques dedicados a lastre limpio de conformidad con lo dispuesto en la regla 13 del presente anexo, o cuando se haya instalado un sistema de limpieza de los tanques de carga que utilice lavado con crudos de conformidad con lo dispuesto en la regla 13B del presente anexo. Esa capacidad podrá reducirse al 1,5% para los petroleros en que la disposición del lavado de tanques, sea tal que, una vez el tanque o los tanques de decantación hayan sido cargados con agua de lavado, ésta baste para el lavado de los tanques y, cuando sea ello aplicable, para proveer el fluido destinado a los aductores, sin introducir agua adicional en el sistema";
3. "El 1% para los buques de carga combinados cuando la carga de hidrocarburos únicamente se transporte en tanques de paredes lisas. Esa capacidad podrá reducirse al 0,8% cuando la disposición del lavado de tanques sea tal que, una vez el tanque o los tanques de decantación hayan sido cargados con agua de lavado, ésta baste para el lavado de los tanques y, cuando sea ello aplicable,

para proveer el fluido motriz destinado a los aductores, sin introducir agua adicional en el sistema".

Por lo tanto en el caso del buque del trabajo, se opta por la opción del 1% de capacidad para los *slops*, se elige esta opción para llevar el máximo de carga posible.

1) Distribución de los tanques de carga

La longitud disponible para la distribución de los tanques de carga del buque, ha sido tomada desde el mamparo de proa, hasta el mamparo a proa de los tanques de decantación, y corresponde a $l = 266,22$ m, respecto a la distancia transversal, ha sido tomada desde el tanque lateral de babor al de estribor, y corresponde aproximadamente a $l = 49$ m.

El buque del proyecto cuenta con un número de 16 tanques, 8 al costado babor y 8 costado de estribor. Estos tanques irán separados longitudinalmente y transversalmente por una serie de mamparos, como indica el reglamento.

Cada tanque tendrá una longitud aproximadamente de $l = 32,81$ m, ya que no todos son simétricos, altura de $h = 27$ m y de ancho $a = 24,5$ m, cumpliendo con la normativa internacional sobre transporte de hidrocarburos.

Zona de carga ó cantara

En este área del buque se estibarán la carga. El compartimentado de la zona de carga está regulado por Marpol y las sociedades de clasificación, ambos reglamentos coinciden en los aspectos comunes.

Algunas sociedades de clasificación utilizan el cuadro siguiente para determinar la capacidad máxima de carga de los tanques en función de los mamparos longitudinales que dispone el buque, como se puede observar en el cuadro siguiente.

Para el caso del buque del trabajo teniendo en cuenta que el buque dispone de un mamparo longitudinal, para ahorrar costes, se empleará la formula resaltada en color naranja.

Number of longitudinal bulkheads inside cargo tanks		One (on centreline)	Two	Three (one on centreline)	Where no longitudinal bulkhead is arranged or where longitudinal bulkheads are perforated across breadth of cargo tanks
Length of wing cargo tank		$\left(0,25 \frac{b_1}{B} + 0,15\right) L_L$	$0,2L_L$	$0,2L_L$	$\left(0,5 \frac{b_1}{B} + 0,1\right) L_L$ or $0,2L_L$ whichever is the lesser
Length of centre tank	$b_1 \geq 0,2B$	—	$0,2L_L$	$0,2L_L$ port and starboard	
	$b_1 < 0,2B$	—	$\left(0,5 \frac{b_1}{B} + 0,1\right) L_L$	$\left(0,25 \frac{b_1}{B} + 0,15\right) L_L$ port and starboard	

Tabla 5. Capacidad máxima de los tanques de carga [24]

En el caso del Convenio Marpol, está recogido en la Regla 24 - Disposición de los tanques de carga y limitación de su capacidad, Capítulo III - Normas para reducir la contaminación causada por petroleros que sufran daños en los costados o en el fondo.

Esta regla establece:

"2) La capacidad y disposición de los tanques de carga de los petroleros serán tales que el derrame hipotético O_c u O_s , calculado de acuerdo con la regla 23 de este anexo, en cualquier punto de la eslora del buque, no excede de 30000 m^3 ó $400 (\text{DW})^{1/3}$, de ambos volúmenes el que sea mayor, pero limitado a un mínimo de 40000 m^3 ".

- En caso de daños en el costado (Regla 23):

$$O_c = S_i * W_i + S_i * K_i * C_i \tag{35}$$

Donde,

$$S_i = 1 - l_i/l_c \tag{36}$$

l_i = longitud del compartimiento ó tanque de lastre

l_c = Extension longitudinal

W_i = Vol. tanque lateral (m^3)

$$K_i = 1 - (b_i/t_c) \quad (37)$$

b_i = Anchura (m) tanque lateral

t_c = Extensión transversal

C_i = Vol. tanque central (m³)

- En caso de daños en el fondo (Regla 23):

$$Os = \frac{1}{3} S_i * Z_i * W_i + S_i * Z_i * C_i \quad (38)$$

$$Z_i = 1 - h_i/t_c \quad (39)$$

h_i = Profundidad mínima doble fondo

Además el Convenio Marpol también especifica:

"La longitud de cada tanque de carga no excederá de 10 m ó de uno de los siguientes valores si fuera mayor:

- a) Para los tanques centrales: si b_i / B es igual o superior a 1/5: 0,2L"

En el caso del buque del trabajo, los tanques de carga cumplen con lo dispuesto tanto en el Convenio Marpol, como en la Sociedad de Clasificación *Bureau Veritas*.

Elaboración del compartimentado del buque

Una vez concluida la ubicación de los mamparos de la zona de carga, se planificará la distribución de los tanques con el objetivo de transportar el máximo de carga cumpliendo con el reglamento y con los criterios de estabilidad de la OMI.

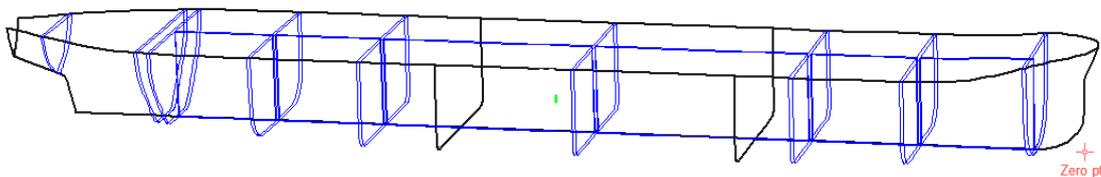


Figura 26. Distribución mamparos zona de carga en 3D

La distribución de los tanques de carga se empieza de popa a proa. Debido a que en la ingeniería naval se determina primero el motor principal, hélice y timón, en función de las características principales del buque y del espacio disponible para ello.

Se empieza por los tanques de carga 001 y 002. Sus coordenadas se indican en la tabla siguiente. La línea de referencia de las coordenadas es la perpendicular de proa.

	Name	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid type	Boundary Surfaces	Aft m	Fore m	F.Port m	F.Stbd. m	F.Top m	F.Bott. m
1	CARGA 001	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-278,500	-247,690	-10,000	-0,500	27,000	2,000
2	CARGA 002	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-278,500	-247,690	0,500	10,000	27,000	2,000

Tabla 6. Coordenadas tanques 001 y 002

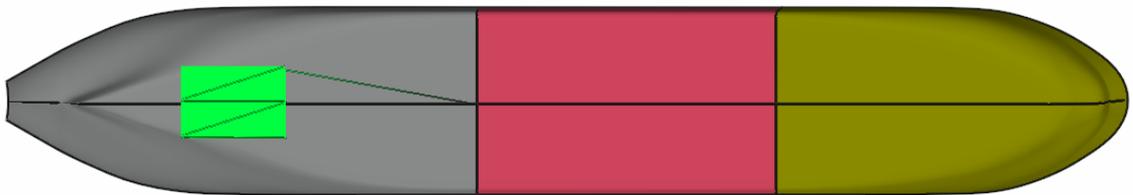


Figura 27. Vista tanque 001 y 002 en 3D

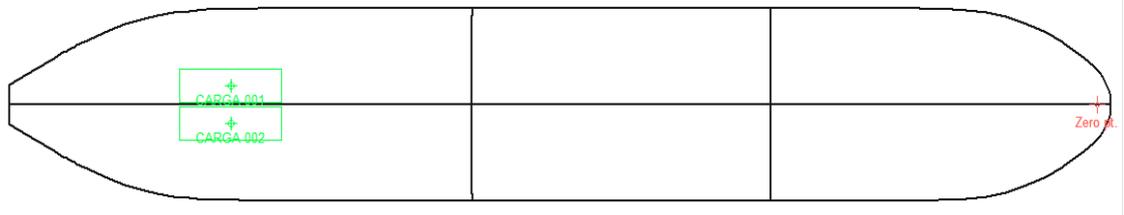


Figura 28. Vista superior tanque 001 y 002

Por lo tanto la distribución de todos los tanques de carga del buque del trabajo queda como se muestra a continuación.



Figura 29. Vista costado estribor del buque en 3D.

En la tabla siguiente se puede observar un resumen de todas las coordenadas de los tanques de carga del buque.

	Name	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid type	Boundary Surfaces	Aft m	Fore m	F.Port m	F.Stbd. m	F.Top m	F.Bott. m
1	CARGA 001	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-278,50	-247,690	-10,000	-0,500	27,000	2,000
2	CARGA 002	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-278,50	-247,690	0,500	10,000	27,000	2,000
3	CARGA 003	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-246,69	-213,880	-20,000	-0,500	27,000	2,000
4	CARGA 004	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-246,69	-213,880	0,500	20,000	27,000	2,000
5	CARGA 005	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-212,88	-181,070	-25,000	-0,500	27,000	2,000
6	CARGA 006	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-212,88	-181,070	0,500	25,000	27,000	2,000
7	CARGA 007	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-181,07	-148,260	-25,000	-0,500	27,000	2,000
8	CARGA 008	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-181,07	-148,260	0,500	25,000	27,000	2,000
9	CARGA 009	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-147,26	-115,450	-25,000	-0,500	27,000	2,000
10	CARGA 010	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-147,26	-115,450	0,500	25,000	27,000	2,000
11	CARGA 011	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-115,45	-82,640	-25,000	-0,500	27,000	2,000
12	CARGA 012	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-115,45	-82,640	0,500	25,000	27,000	2,000
13	CARGA 013	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-81,640	-49,830	-20,000	-0,500	27,000	2,000
14	CARGA 014	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-81,640	-49,830	0,500	20,000	27,000	2,000
15	CARGA 015	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-48,830	-15,020	-10,000	-0,500	29,000	2,000
16	CARGA 016	Tank	100	100	0,9443	Fuel Oil	none	-48,830	-15,020	0,500	10,000	29,000	2,000

Tabla 7. Coordenadas tanques de carga

Finalmente la distribución total del buque del trabajo quedaría de la forma siguiente, con los tanques de carga, de lastre, cámara de máquinas, etc.

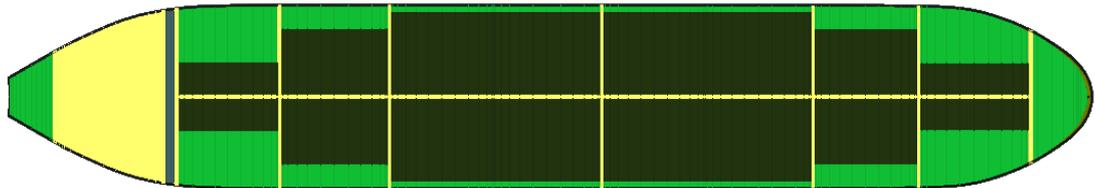


Figura 30. Distribución completa del buque

Donde,

Fluido	Color
Agua de lastre	
Fuel Oil	

Tabla 8. Leyenda Figura 30

5.2.3. Determinación de la estabilidad del buque en diferentes situaciones de carga

1) Cálculo de curvas hidrostáticas a diferentes calados

En este apartado se exponen las características hidrostáticas del buque (tabla 9) y posteriormente se determinan las curvas hidrostáticas para cada situación de carga (tabla 10).

Para llevar a cabo el cálculo de las curvas hidrostáticas del buque intacto, se toma como origen de coordenadas la perpendicular de popa.

Measurement	Value	Units
Displacement	271748	T
Volume (displaced)	265120,137	m ³
Draft at AP	18,16	M
Draft Amidships	18,16	M
Draft at FP	18,16	M
WL Length	330,36	M
Beam max extents on WL	54,254	M
Waterpl. Area	15884,54	m ²
Prismatic coeff. (Cp)	0,818	
Block coeff. (Cb)	0,814	
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,996	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,886	
LCB length	-151,939	M
LCF length	-159,103	M
KB	9,413	M
KG	0,411	M
BMt	13,345	M
BML	442,385	M
GMt	22,347	M
GML	451,387	M
KMt	22,758	M
KML	451,798	M

Tabla 9. Características hidrostáticas del buque

Tras la exposición de las características hidrostáticas del buque del proyecto, se presenta la tabla de hidrostáticas para los diferentes calados del buque (tabla 10), correspondiente a las situaciones de carga que se analizan más adelante. Empezando por un calado de D= 10,83 m correspondiente a la primera situación de carga, calado

de $D= 18,16$ m correspondiente a la segunda situación de carga y por último el calado de la tercera situación de carga cuyo calado del buque es de $D= 10,86$ m y con un trimado de cero grados en cada caso.

Measurement	Value	Value	Value
Displacement	155539	271585	156060
Volume (displaced)	151745,266	264961,296	152253,417
Draft Amidships	10,829	18,16	10,863
Length	330,36	330,36	330,36
Beam max extents on WL	54,254	54,254	54,254
Waterpl. Area	14943,494	15883,651	14947,749
Prismatic coeff. (Cp)	0,827	0,818	0,827
Block coeff. (Cb)	0,821	0,814	0,821
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,876	0,886	0,876
LCB length	-149,298	-151,935	-149,305
LCF length	-151,381	-159,096	-151,412
KB	5,584	9,408	5,602
KG	11,185	13,318	10,673
BMt	21,807	13,352	21,742
BML	645,684	442,579	644,052
GMt	16,206	9,442	16,67
GML	640,083	438,669	638,981
KMt	27,391	22,76	27,343
KML	651,268	451,987	649,654

Tabla 10. Tabla de hidrostáticas para un calado de $D= 10,83$ m

Con el modulo *Stability* también se pueden hallar las curvas de Bonjean. Estas curvas son conocidas mundialmente y permiten establecer el volumen de desplazamiento del buque a cualquier calado. Generalmente se utilizan cuando el asiento del buque es diferente del asiento con el que se han construido las curvas hidrostáticas. [6]

2) Criterios de estabilidad para diferentes situaciones de carga

En este apartado se estudian diferentes condiciones de carga que se pueden dar en la vida útil del buque del proyecto. Para ello se utiliza el modulo *Stability* del programa **Maxsurf** y los criterios de estabilidad de la IMO del programa, para realizar los diferentes análisis de estabilidad.

En el menú principal del programa desplegamos la opción "Analysis" - "Criteria" y aparece el desplegable de la figura 31. En el cual se pueden elegir los criterios para realizar el análisis de estabilidad, de las situaciones de carga del buque.

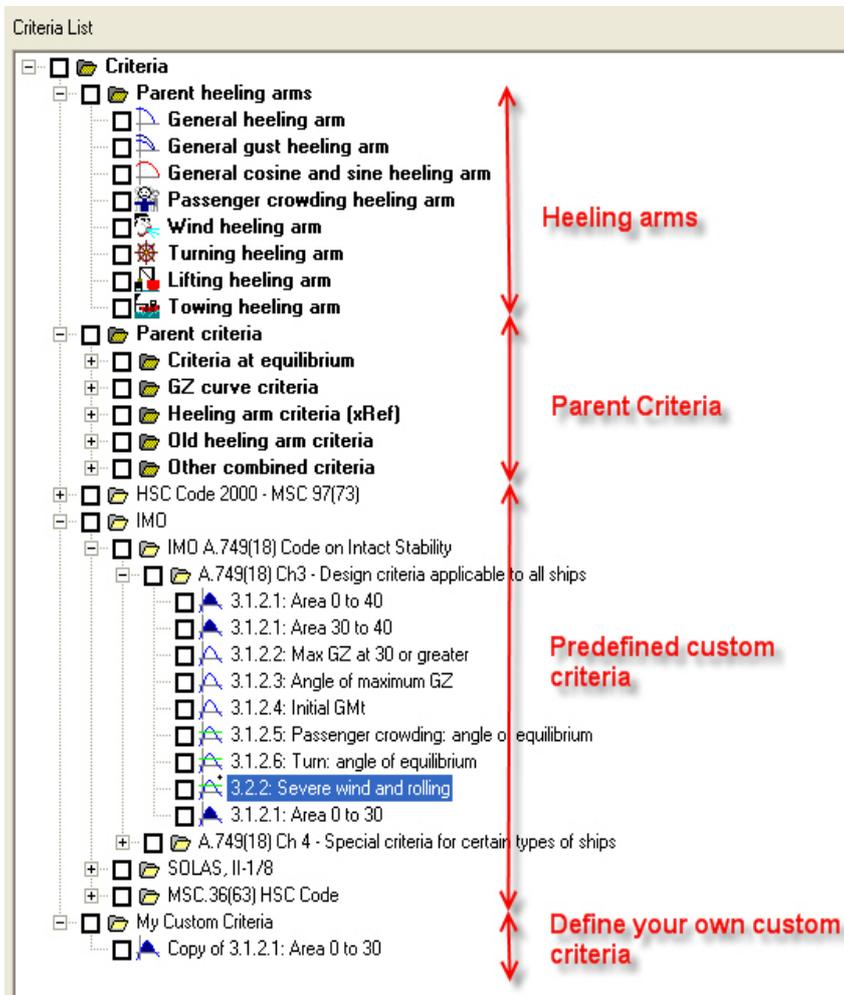


Figura 31. Criterios módulo *Stability*. [7]

Tras comprobar el método de análisis del programa, se realiza a continuación un desglose de los criterios de la IMO del módulo *Stability*.

- El área contenida por la curva GZ hasta un ángulo de 30° , no debe de ser menor de $0,055 \text{ m} \cdot \text{rad}$ ($3,151 \text{ m} \cdot \text{deg}$).
- El área contenida por la curva GZ hasta un ángulo de 40° , no debe de ser menor de $0,09 \text{ m} \cdot \text{rad}$ ($5,157 \text{ m} \cdot \text{deg}$).

- El área contenida por la curva GZ comprendida entre los 30° y 40° ó entre 30° y el ángulo del punto de inundación progresiva, no debe de ser menor de 0,03 m*rad (1,719 m*deg).
- El brazo GZ para un ángulo mayor ó igual de 30°, debe de ser mayor de 0,2 m.
- El ángulo en el que se produce el máximo en la curva de brazos adrizantes GZ no debe de ser menor de 25°.

Una vez detallado como se va a realizar el estudio de las diferentes situaciones de carga del buque, se empieza por la primera situación de carga del buque del proyecto.

SITUACIÓN 1: Buque en lastre.

En este caso se realiza el estudio de estabilidad del buque utilizando para ello el módulo *Stabiliy*, en una situación de lastre, es decir, con los tanques laterales, dobles fondos y piques de proa y popa llenos. En la tabla 11 se presenta el estado de los tanques y compartimentos del buque, además de la distribución del tanque.

En esta condición de carga, los dobles fondos y doble casco se encuentran al 100% de su capacidad, sin poner en riesgo la estabilidad del buque. En caso de la necesidad de incrementar la estabilidad del buque, el Apartado 3 de la regla 18-Parte A del Anexo I de Marpol. Establece que se permite llenar los tanques de carga con lastre para mantener la seguridad del buque durante su navegación, en condiciones de meteorológicas duras o bajo determinación del Capitán del buque.

La regla solamente permite llenar aquellos tanques de carga que hayan sido lavados con crudo, según Regla 35 Anexo I de Marpol.

Item Name	Quantity	Unit Tn	Total Mass	Long Arm	Tran Arm	Vert Arm	FSM	FSM TYPE
Buque rosca	-	36982	36982	-164	0	13,56	0	User Specified
Tank agua dulce	100%	674	674	-314	0	18	0	Maximum
Combustible	100%	216	216	-314	0	23	0	Maximum

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

Pertrechos & viveres	0,34%	316	1	-314	0	24	0	Maximum
Peak popa	100%	2114	2114	-322	0	22	0	Maximum
Slop br	100%	248	248	-293	-3	1	0	Maximum
Slop er	100%	248	248	-293	3	1	0	Maximum
Doble fondo 001 br	100%	1342	1342	-281	-11	16	0	Maximum
Doble fondo 002 er	100%	1342	1342	-281	11	16	0	Maximum
Doble fondo slop	100%	118	118	-281	0	1	0	Maximum
Lastre lateral 001	100%	10903	10903	-262	-18	15	0	Maximum
Lastre lateral 002	100%	11015	11015	-262	18	15	0	Maximum
Doble fondo 003	100%	924	924	-261	-8	1	0	Maximum
Doble fondo 004	100%	924	924	-261	8	1	0	Maximum
Carga 001	0%	6692	0	-263	5	2	0	Maximum
Carga 002	0%	6692	0	-263	-5	2	0	Maximum
Lastre lateral 003	100%	1549	1549	-230	-12	1	0	Maximum
Lastre lateral 004	100%	1549	1549	-230	12	1	0	Maximum
Doble fondo 005	100%	5556	5556	-230	23	14	0	Maximum
Doble fondo 006	100%	5556	5556	-230	-23	14	0	Maximum
Carga 003	0%	14628	0	-230	-10	2	0	Maximum
Carga 004	0%	14628	0	-230	10	2	0	Maximum
Lastre lateral 005	100%	1578	1578	-197	26	14	0	Maximum
Lastre lateral 006	100%	1578	1578	-197	-26	14	0	Maximum
Doble fondo 007	100%	1664	1664	-197	-13	1	0	Maximum
Doble fondo 008	100%	1664	1664	-197	13	1	0	Maximum
Carga 005	0%	17819	0	-197	-13	2	0	Maximum
Carga 006	0%	17819	0	-197	13	2	0	Maximum
Lastre lateral 007	100%	1628	1628	-165	-26	14	0	Maximum
Lastre lateral 008	100%	1628	1628	-165	26	14	0	Maximum
Doble fondo 009	100%	1722	1722	-165	-13	1	0	Maximum
Doble fondo010	100%	1722	1722	-165	13	1	0	Maximum
Carga 007	0%	18379	0	-165	-13	2	0	Maximum
Carga 008	0%	18379	0	-165	13	2	0	Maximum
Lastre lateral 009	100%	1579	1579	-131	-26	14	0	Maximum

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

Lastre lateral 010	100%	1579	1579	-131	26	14	0	Maximum
Doble fondo 011	100%	1670	1670	-131	-13	1	0	Maximum
Doble fondo 012	100%	1670	1670	-131	13	1	0	Maximum
Carga 009	0%	17819	0	-131	-13	2	0	Maximum
Carga 010	0%	17819	0	-131	13	2	0	Maximum
Lastre lateral 011	100%	1628	1628	-99	-26	14	0	Maximum
Lastre lateral 012	100%	1628	1628	-99	26	14	0	Maximum
Doble fondo 013	100%	1717	1717	-99	13	1	0	Maximum
Doble fondo 014	100%	1717	1717	-99	-13	1	0	Maximum
Carga 011	0%	18379	0	-99	-13	2	0	Maximum
Carga 012	0%	18379	0	-99	13	2	0	Maximum
Lastre lateral 013	100%	5440	5440	-66	-23	14	0	Maximum
Lastre lateral 014	100%	5440	5440	-66	23	14	0	Maximum
Doble fondo 015	100%	1549	1549	-66	-12	1	0	Maximum
Doble fondo 016	100%	1549	1549	-66	12	1	0	Maximum
Carga 013	0%	14183	0	-66	-10	2	0	Maximum
Carga 014	0%	14183	0	-66	10	2	0	Maximum
Lastre lateral 015	100%	11648	11648	-33	-17	15	0	Maximum
Lastre lateral 016	100%	11648	11648	-33	17	15	0	Maximum
Doble fondo 017	100%	1140	1140	-34	-9	1	0	Maximum
Doble fondo 018	100%	1140	1140	-34	9	1	0	Maximum
Carga 015	0%	7625	0	-32	-5	2	0	Maximum
Carga 016	0%	7625	0	-32	5	2	0	Maximum
Peak proa	100%	9449	9449	-8	0	18	0	Maximum
Total Loadcase			156638	-148	0	13		

Tabla 11. Relación tanques con lastre

Se continúa con el estudio de la situación de carga analizando la estabilidad estática transversal del buque del proyecto en situación de lastre. En la ilustración de abajo (figura 32) se presenta la curva de brazos adrizantes GZ de esta situación de carga.

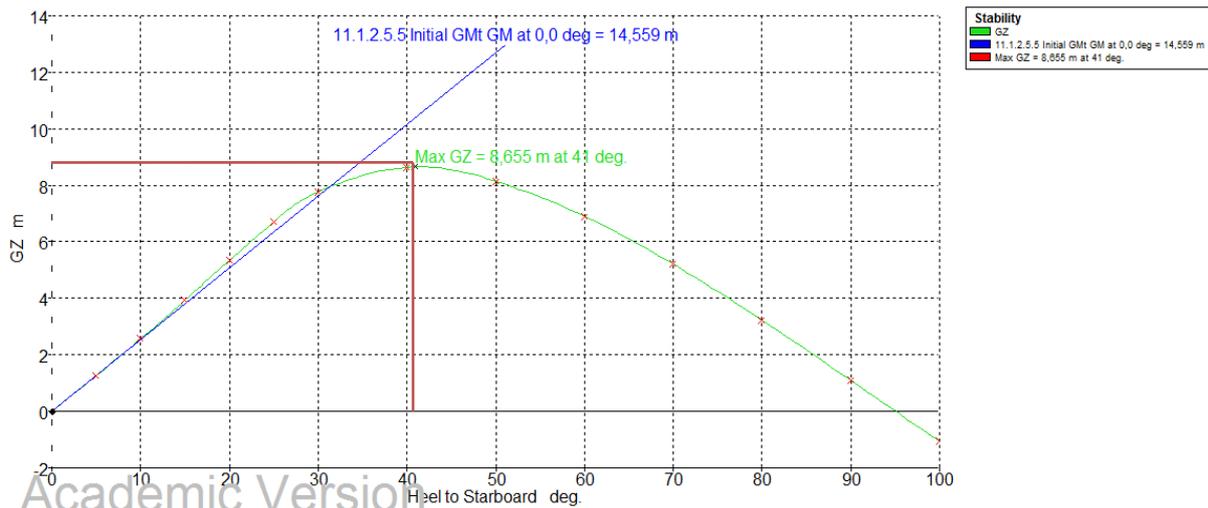


Figura 32. Brazo adrizante situación 1 de carga del buque

Seguidamente se comprueba si cumple el buque del trabajo con los criterios de estabilidad estática transversal en la situación número 1 (tabla 12).

Parámetro	Criterio	Situación Carga 1
Altura metacéntrica Transversal (GMt)	Mayor o igual a 0,35 m	Cumple
Brazo adrizante GZ	GZ máximo corresponderá a una escora de al menos 25°	Cumple
	GZ será como mínimo de 0,20 m para una escora igual o superior a 30°.	Cumple

Tabla 12. Brazo adrizante situación de carga número 1

Posteriormente y para finalizar el análisis de esta situación de carga, se procede al estudio de estabilidad dinámica, a través de la curva que se muestra en la figura 33.

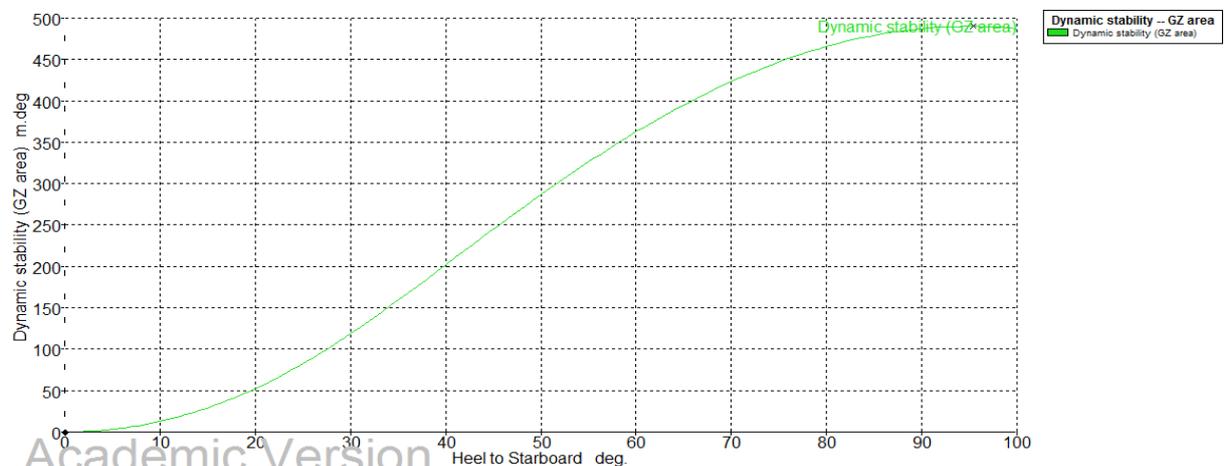


Figura 33. Estabilidad dinámica de la situación de carga 1

A través de la tabla 13 se comprueba que el buque cumple con los criterios de estabilidad dinámica de la OMI.

Parámetro	Criterio	Situación carga 1
Área que contiene la curva de brazo adrizante hasta 30°	No debe de ser inferior a 0,055 m-rad	Cumple
Área de la curva de brazos adrizantes hasta 40°.	No será inferior a 0,090 m-rad	Cumple
Estabilidad dinámica entre las escoras de 0° y 40° ó escora de inundación si es menor de 40°.	Tendrá un valor mínimo de 0,090 m-rad.	Cumple

Tabla 13. criterios de estabilidad dinámica en la situación de carga 1

Para concluir el estudio de la primera situación se muestra el costado de estribor del buque en situación de carga 1 con los tanques de doble fondo, doble casco y piques de proa y popa llenos (figura 34). Las líneas verticales que se pueden visualizar en la imagen corresponden a los mamparos verticales.



Figura 34. Vista lateral del buque en situación del lastre

SITUACIÓN 2: buque plena carga

En esta situación de carga, el buque se encuentra con los tanque de carga llenos, al 100% de su capacidad y, con los tanques de doble fondo y doble casco vacíos, así como los piques de proa y popa.

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

En este caso de la situación de carga 2, el Convenio Marpol exige que la hélice del buque quede suficientemente sumergida y un asiento moderado fijado en 3 metros máximo para evitar pantocazos en proa.

Item Name	Quantity	Unit Mass	Total Mass	Long Arm	Vert Arm	Long Arm	FSM	FSM TYPE
Buque rosca	-	36982	36982	-164	0	13,56	0	User Specified
Tank agua dulce	100%	216	216	-314	0	23	0	Maximum
Combustible	100%	674	674	-314	0	18	0	Maximum
Pertrechos & viveres	0,34%	316	1	-314	0	24	0	Maximum
Peak popa	0%	2114	0	-317	0	12	0	Maximum
Slop br	100%	1342	1342	-281	-11	16	0	Maximum
Slop er	100%	1342	1342	-281	11	16	0	Maximum
Doble fondo 001 br	0%	248	0	-162	0	0	0	Maximum
Doble fondo 002 er	0%	248	0	-162	0	0	0	Maximum
Doble fondo slop	0%	118	0	-280	0	0	0	Maximum
Lastre lateral 001	0%	10903	0	-248	-11	2	0	Maximum
Lastre lateral 002	0%	11015	0	-248	11	2	0	Maximum
Doble fondo 003	0%	924	0	-248	0	0	0	Maximum
Doble fondo 004	0%	924	0	-248	0	0	0	Maximum
Carga 001	100%	6692	6692	-263	-5	14	0	Maximum
Carga 002	100%	6692	6692	-263	5	14	0	Maximum
Lastre lateral 003	0%	5556	0	-214	-16	2	0	Maximum
Lastre lateral 004	0%	5556	0	-214	16	2	0	Maximum
Doble fondo 005	0%	1549	0	-214	0	0	0	Maximum
Doble fondo 006	0%	1549	0	-214	0	0	0	Maximum
Carga 003	100%	14628	14628	-230	-10	14	0	Maximum
Carga 004	100%	14628	14628	-230	10	14	0	Maximum
Lastre lateral 005	0%	1578	0	-181	-17	2	0	Maximum
Lastre lateral 006	0%	1578	0	-181	17	2	0	Maximum

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

Doble fondo 007	0%	1664	0	-181	0	0	0	Maximu m
Doble fondo 008	0%	1664	0	-181	0	0	0	Maximu m
Carga 005	100%	17819	17819	-197	-13	14	0	Maximu m
Carga 006	100%	17819	17819	-197	13	14	0	Maximu m
Lastre lateral 007	0%	1628	0	-148	-17	2	0	Maximu m
Lastre lateral 008	0%	1628	0	-148	17	2	0	Maximu m
Doble fondo 009	0%	1722	0	-148	0	0	0	Maximu m
Doble fondo010	0%	1722	0	-148	0	0	0	Maximu m
Carga 007	100%	18379	18379	-165	-13	14	0	Maximu m
Carga 008	100%	18379	18379	-165	13	14	0	Maximu m
Lastre lateral 009	0%	1579	0	-116	-17	2	0	Maximu m
Lastre lateral 010	0%	1579	0	-116	17	2	0	Maximu m
Doble fondo 011	0%	1670	0	-116	0	0	0	Maximu m
Doble fondo 012	0%	1670	0	-116	0	0	0	Maximu m
Carga 009	100%	17819	17819	-131	-13	14	0	Maximu m
Carga 010	100%	17819	17819	-131	13	14	0	Maximu m
Lastre lateral 011	0%	1628	0	-83	-17	2	0	Maximu m
Lastre lateral 012	0%	1628	0	-83	17	2	0	Maximu m
Doble fondo 013	0%	1717	0	-83	0	0	0	Maximu m
Doble fondo 014	0%	1717	0	-83	0	0	0	Maximu m
Carga 011	100%	18379	18379	-99	-13	14	0	Maximu m
Carga 012	100%	18379	18379	-99	13	14	0	Maximu m
Lastre lateral 013	0%	5440	0	-50	-15	2	0	Maximu m
Lastre lateral 014	0%	5440	0	-50	15	2	0	Maximu m
Doble fondo 015	0%	1549	0	-50	0	0	0	Maximu m
Doble fondo 016	0%	1549	0	-50	0	0	0	Maximu m
Carga 013	100%	14183	14183	-66	-10	14	0	Maximu m
Carga 014	100%	14183	14183	-66	10	14	0	Maximu m
Lastre lateral 015	0%	11648	0	-15	-7	2	0	Maximu m

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

Lastre lateral 016	0%	11648	0	-15	7	2	0	Maximum
Doble fondo 017	0%	1140	0	-16	0	0	0	Maximum
Doble fondo 018	0%	1140	0	-16	0	0	0	Maximum
Carga 015	100%	7625	7625	-32	-5	15	0	Maximum
Carga 016	100%	7625	7625	-32	5	15	0	Maximum
Peak proa	0%	9449	0	-13	0	0	0	Maximum
Total Loadcase			271608	-151	0	14	8344	

Tabla 14. Situación 2 buque a plena carga

Una vez realizada la tabla 14 de la distribución de los pesos en la situación número 2 de carga del buque, se sigue con el análisis de la estabilidad estática del buque. Empezando por la curva de brazo adrizante GZ (figura 35).

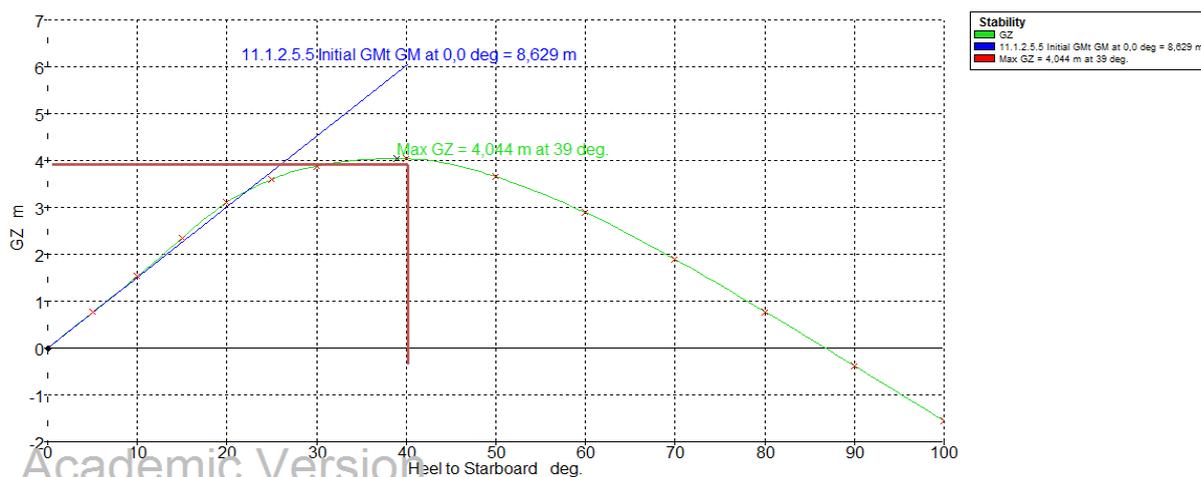


Figura 35. Brazo adrizante situación 2 de carga del buque

Tras finalizar el análisis de la curva de brazo adrizante GZ, se continúa con el estudio de los criterios de estabilidad estática transversal en esta situación 2 de carga del buque (tabla 15).

Parámetro	Criterio	Situación Carga 1
Altura metacéntrica Transversal (GMt)	Mayor o igual a 0,35 m	Cumple
Brazo adrizante GZ	GZ máximo corresponderá a una escora de al menos 25°	Cumple
	GZ será como mínimo de 0,20 m para una escora igual o superior a 30°.	Cumple

Tabla 15. Criterios de estabilidad estática transversal

Se continúa con el análisis de la situación de carga 2, haciendo el estudio de la estabilidad dinámica del buque del proyecto. Para ello se comenzará realizando la curva de estabilidad dinámica, como se muestra en la figura 36.

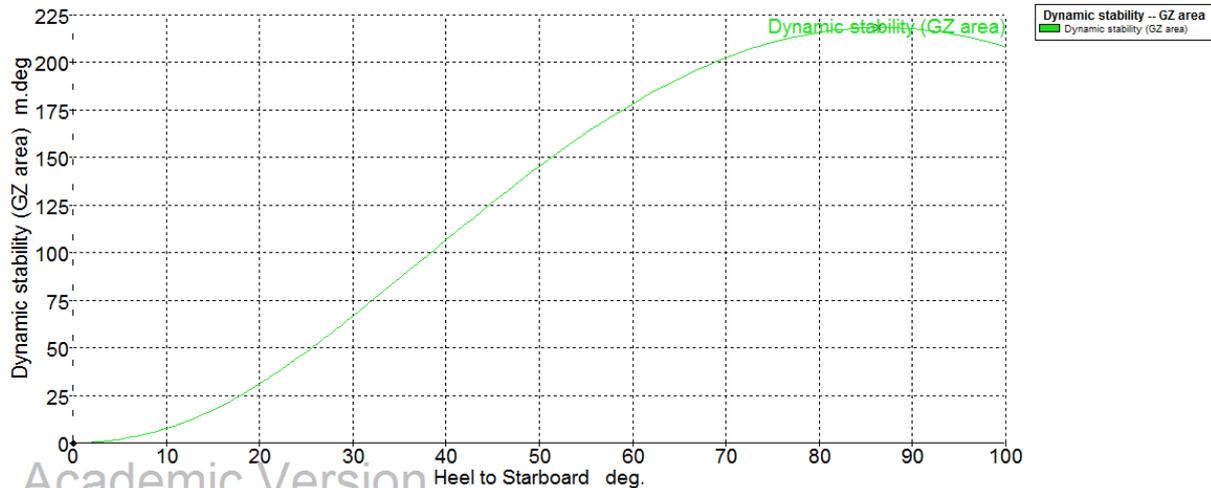


Figura 36. Estabilidad estática situación de carga dos

Una vez realizada la curva, se comprueba a través de la tabla 16, que el buque cumple con los criterios sobre estabilidad de la OMI.

Parámetro	Criterio	Situación carga 1
Área que contiene la curva de brazo adrizante hasta 30°	No debe de ser inferior a 0,055 m-rad	Cumple
Área de la curva de brazos adrizantes hasta 40°.	No será inferior a 0,090 m-rad	Cumple
Estabilidad dinámica entre las escoras de 0° y 40° ó escora de inundación si es menor de 40°.	Tendrá un valor mínimo de 0,090 m-rad.	Cumple

Tabla 16. Estudio estabilidad dinámica situación carga 2

Finalmente se presenta el costado de estribor del buque (figura 37) en la situación de carga número 2 con los tanques de carga llenos y los doble fondos, doble casco y piques de proa y popa vacíos, realizado a través del módulo *Stability* de **Maxsurf**.



Figura 37. Vista lateral buque situación carga número 2

SITUACIÓN 3: Superficies libres

En esta situación el buque se encuentra, con tanques un nivel de llenado inferior al 98% de su capacidad a media carga, es decir, a bordo se encuentra en situación de superficies libres. Esta situación se puede dar cuando el buque debe transportar diferentes productos, pero la cantidad de estos no es la suficiente para llenar al 100% los tanques. El módulo *Stability* utiliza los criterios de la IMO para la corrección por superficies libres ó FSM (*free surface moment*) como se observa a continuación.

El programa utiliza para calcular las correcciones por superficies la, "Resolución A.749(18) Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques regidos por los instrumentos de la OMI", concretamente el Capítulo 3, apartado 3.3 que dice, "efecto de las superficies libres de los líquidos en los tanque".

Item Name	Quantity	Unit Mass	Total Mass	Long Arm	Trans Arm	Vert Arm	FSM	FSM TYPE
Buque rosca	-	36982	36982	-164	0	13,56	0	User Specified
Tank agua dulce	100%	216	216	-314	0	23	0	Maximum
Combustible	100%	674	674	-314	0	18	0	Maximum
Pertrechos & viveres	0%	316	1	-314	0	24	8344	Maximum
Peak popa	0%	2114	0	-317	0	12	0	Maximum
Slop br	100%	1342	1342	-281	-11	16	0	Maximum
Slop er	100%	1342	1342	-281	11	16	0	Maximum
Doble fondo 001 br	0%	248	0	-162	0	0	0	Maximum
Doble fondo 002 er	0%	248	0	-162	0	0	0	Maximum
Doble fondo slop	0%	118	0	-281	0	0	0	Maximum
Lastre lateral 001	0%	10903	0	-260	-14	2	0	Maximum
Lastre lateral 002	0%	11015	0	-260	14	2	0	Maximum
Doble fondo 003	0%	924	0	-269	-1	0	0	Maximum

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

Doble fondo 004	0%	924	0	-269	1	0	0	Maximum
Carga 001	50%	6692	3346	-263	-5	8	2079	IMO A.749(18)
Carga 002	50%	6692	3346	-263	5	8	2079	IMO A.749(18)
Lastre lateral 003	0%	5556	0	-228	-23	2	0	Maximum
Lastre lateral 004	0%	5556	0	-228	23	2	0	Maximum
Doble fondo 005	0%	1549	0	-219	-1	0	0	Maximum
Doble fondo 006	0%	1549	0	-219	1	0	0	Maximum
Carga 003	50%	14628	7314	-230	-10	8	19144	IMO A.749(18)
Carga 004	50%	14628	7314	-230	10	8	19144	IMO A.749(18)
Lastre lateral 005	0%	1578	0	-197	-26	2	0	Maximum
Lastre lateral 006	0%	1578	0	-197	26	2	0	Maximum
Doble fondo 007	0%	1664	0	-197	-1	0	0	Maximum
Doble fondo 008	0%	1664	0	-197	1	0	0	Maximum
Carga 005	50%	17819	8910	-197	-13	8	36812	IMO A.749(18)
Carga 006	50%	17819	8910	-197	13	8	36812	IMO A.749(18)
Lastre lateral 007	0%	1628	0	-165	-26	2	0	Maximum
Lastre lateral 008	0%	1628	0	-165	26	2	0	Maximum
Doble fondo 009	0%	1722	0	-165	-1	0	0	Maximum
Doble fondo010	0%	1722	0	-165	1	0	0	Maximum
Carga 007	50%	18379	9190	-165	-13	8	37969	IMO A.749(18)
Carga 008	50%	18379	9190	-165	13	8	37969	IMO A.749(18)
Lastre lateral 009	0%	1579	0	-131	-26	2	0	Maximum
Lastre lateral 010	0%	1579	0	-131	26	2	0	Maximum
Doble fondo 011	0%	1670	0	-131	-1	0	0	Maximum
Doble fondo 012	0%	1670	0	-131	1	0	0	Maximum
Carga 009	50%	17819	8910	-131	-13	8	36812	IMO A.749(18)
Carga 010	50%	17819	8910	-131	13	8	36812	IMO A.749(18)

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y DE ESTABILIDAD DE UN BUQUE PETROLERO

Lastre lateral 011	0%	1628	0	-99	-26	2	0	Maximum
Lastre lateral 012	0%	1628	0	-99	26	2	0	Maximum
Doble fondo 013	0%	1717	0	-99	-1	0	0	Maximum
Doble fondo 014	0%	1717	0	-99	1	0	0	Maximum
Carga 011	50%	18379	9190	-99	-13	8	37969	IMO A.749(18)
Carga 012	50%	18379	9190	-99	13	8	37969	IMO A.749(18)
Lastre lateral 013	0%	5440	0	-67	-23	2	0	Maximum
Lastre lateral 014	0%	5440	0	-67	23	2	0	Maximum
Doble fondo 015	0%	1549	0	-67	-1	0	0	Maximum
Doble fondo 016	0%	1549	0	-67	1	0	0	Maximum
Carga 013	50%	14183	7091	-66	-10	8	18560	IMO A.749(18)
Carga 014	50%	14183	7091	-66	10	8	18560	IMO A.749(18)
Lastre lateral 015	0%	11648	0	-36	-15	2	0	Maximum
Lastre lateral 016	0%	11648	0	-36	15	2	0	Maximum
Doble fondo 017	0%	1140	0	-43	-1	0	0	Maximum
Doble fondo 018	0%	1140	0	-43	1	0	0	Maximum
Carga 015	50%	7625	3813	-32	-5	8	1999	IMO A.749(18)
Carga 016	50%	7625	3813	-32	5	8	1999	IMO A.749(18)
Peak proa	0%	9449	0	-13	0	0	0	Maximum
Total Loadcase			156083	-154	0	10	391034	

Tabla 17. Situación de carga con superficies libres

Una vez realizada la tabla 17 de correcciones por superficies libres con el módulo *Stability* procedemos a realizar el estudio de la estabilidad estática transversal de la situación 3 (figura 38).

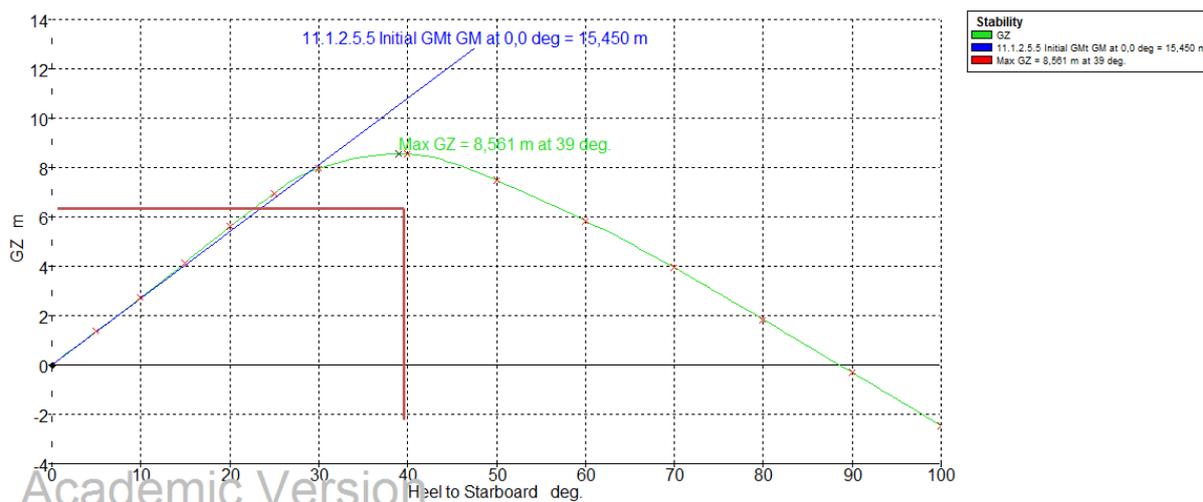


Figura 38. Estabilidad estática transversal situación 3 de carga.

A continuación emplearemos los criterios de estabilidad recogidos en el Convenio Marpol 73/78 relacionados con las superficies libres. Estos criterios pertenecen al Anexo I que dice, "Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos", dentro de del Anexo I, el Capítulo III dice "Normas para reducir la contaminación causada por petroleros que sufran daños en los costados o en el fondo", aunque de este capítulo lo que interesa para llevar a cabo los criterios de estabilidad es la Regla 25, que dice Compartimentado y estabilidad (Regla 25), concretamente la que se ajusta a este estudio de estabilidad es la Regla 25A que se denomina "Estabilidad sin avería"

Regla 25A

- En puerto, la altura metacéntrica inicial GM_0 , corregida con respecto a la superficie libre medida con un ángulo de escora de 0° , no será inferior a 0,15 m.

- En la mar se aplicarán los siguientes criterios:

- El área situada bajo la curva de brazos adrizantes GZ, no será inferior a 0,055 m-rad hasta un ángulo de escora de 30° ni inferior a 40° . Además el área situada bajo la curva de brazos adrizantes GZ entre los ángulos de escora de 30° y 40° ó entre los ángulos de 30° y θ_f . Si este ángulo es inferior a 40° , no será inferior a 0,03 m-rad.

- El brazo adrizante GZ será como mínimo de 0,20 m a un ángulo de escora igual o superior a 30°.
- El brazo adrizante máximo corresponderá a un ángulo de escora preferiblemente superior a 30° pero no inferior a 25°.
- La altura metacéntrica inicial GM_0 , corregida para una superficie libre medida a un ángulo de 0° de escora, no será inferior a 0,15 m.

En la Tabla superior de la gráfica que representa la curva de brazo adrizante GZ, se puede comprobar que el buque cumple con los criterios en la situación 3 de carga.

Seguidamente se realiza el estudio de la estabilidad dinámica para esta última situación de carga, mediante la gráfica de la figura 39.

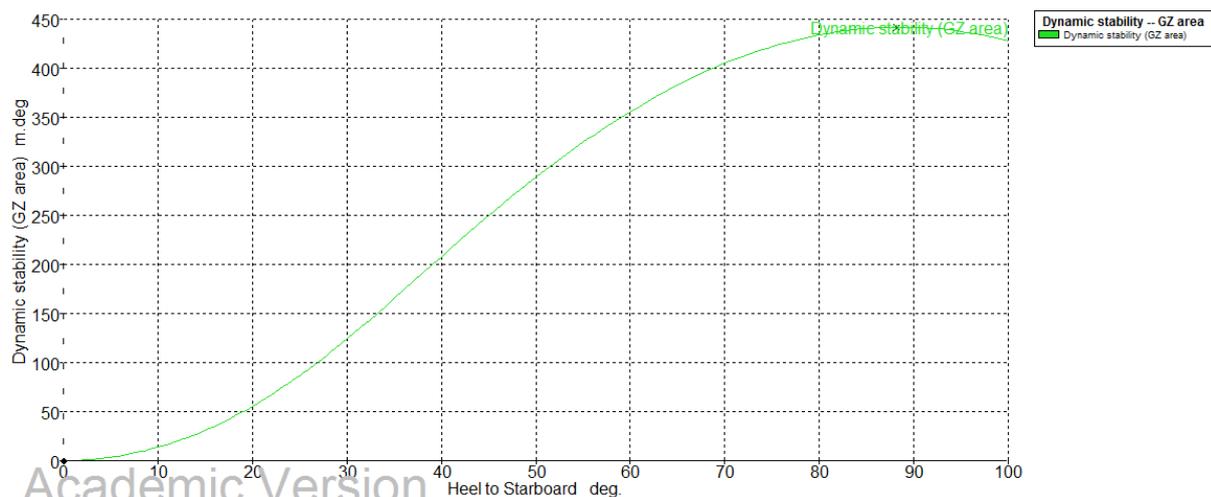


Figura 39. Curva estabilidad dinámica situación carga 3

Posteriormente se realiza el análisis de la curva de estabilidad dinámica para comprobar que una vez más el buque cumple con los criterios (tabla 18).

Parámetro	Criterio	Situación carga 1
Área que contiene la curva de brazo adrizante hasta 30°	No debe de ser inferior a 0,055 m-rad	Cumplean
Área de la curva de brazos adrizantes hasta 40°.	No será inferior a 0,090 m-rad	Cumple
Estabilidad dinámica entre las escoras de 0° y 40° ó escora de inundación si es menor de 40°.	Tendrá un valor mínimo de 0,090 m-rad.	Cumple

Tabla 18. Criterios de la estabilidad dinámica situación carga 3

En la figura 40 se observa la vista lateral del buque en situación 3 de carga con superficies libres.

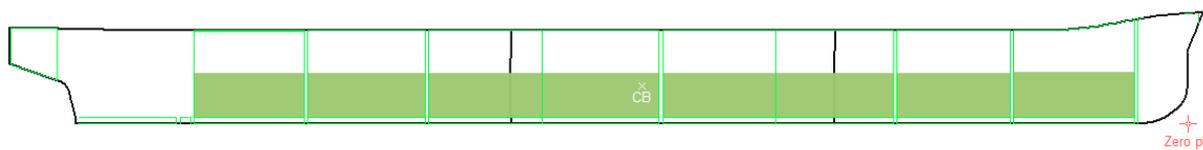


Figura 40. Vista lateral del buque en situación de carga 3

5.4. COMPORTAMIENTO DEL BUQUE EN LA MAR

Finalmente, a través del módulo *Motions* de **Maxsurf** se analizan los efectos del oleaje sobre el buque del proyecto. El estudio se lleva a cabo eligiendo las características del oleaje que ponen a prueba los límites y la estabilidad del buque.

La altura de las olas elegidas será de $h= 10$ m y la frecuencia $\omega= 0,347$ rad/s, porque es un tamaño de ola y una frecuencia que ponen a prueba la estabilidad y fiabilidad del buque del proyecto.

Características principales del buque:

- $L_{pp}= 330$ m
- $D= 18,17$ m
- $B= 54$ m

- $V_S = 15 \text{ Kn}$
- Número de Froude (F_n): 0,85

En este apartado se exponen los diferentes casos de los efectos del oleaje sobre el buque, en función de la dirección de procedencia de las olas, es decir, si el oleaje viene por la proa y amura. El objetivo principal es comprobar el límite del buque sobre los efectos de estas olas.

En cada caso mediante una gráfica se mostrará la función de transferencia, denominada RAO, que representará la respuesta de oscilación del buque ante las diferentes olas regulares de distintas frecuencias y de amplitud unitaria.[15]

Caso I, el buque recibe las olas por proa

A través de esta gráfica (figura 41) se pretenden analizar los efectos del oleaje sobre el buque, cuando éste recibe las olas por la proa con un ángulo de 180° .

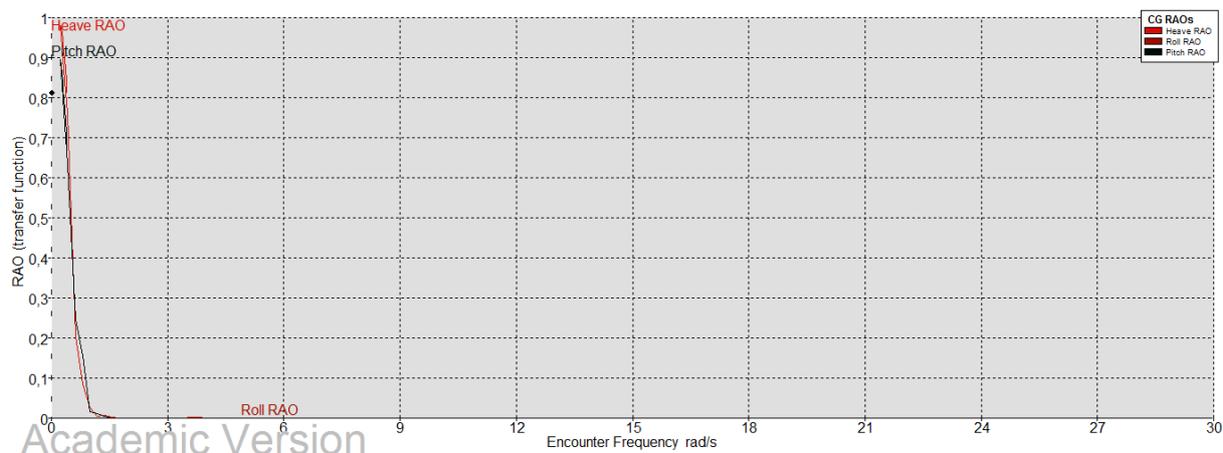


Figura 41. Efecto del oleaje con olas por proa.

En la figura 41 se puede observar en el eje de abscisas los valores de frecuencias de encuentro "buque ola", medidos en radianes/segundos, correspondientes a longitudes de ondas. En el eje de ordenadas se encuentra la respuesta del buque al interactuar con las olas de diferentes amplitudes, es decir, el cociente de la elevación del buque respecto a la superficie del agua, entre la amplitud de la ola, medido en metros.[15,17]

Se puede concluir que para frecuencias bajas $\omega = 0,2 - 0,3 \text{ rad/s}$. la RAO de *Heave*, *Pitch* tiende a la unidad y es donde el movimiento de cabeceo del buque del proyecto es más

notorio. Si la curva de la respuesta del buque tuviera un pico mayor que la unidad se presentarían problemas de resonancia. Respecto a frecuencias altas, la respuesta del buque tiende a 0, como es el caso de la RAO de *Roll*, debido a que las ondas cortas a lo largo de la eslora del buque del proyecto se cancelan y por lo tanto, el movimiento de cabeceo, vertical y de balance apenas se aprecia.[16,27]

Las RAOS dependen de la dirección del oleaje, altura y período de la ola y también de la frecuencia relativa de encuentro entre las olas y el buque. Por ello es diferente si el oleaje viene por popa o proa. Dado que en este caso el buque recibe las olas por la proa, el movimiento más notable es el de arfada o *heave*, que corresponde al movimiento vertical de ascenso y descenso.[15,16]

Se prosigue el estudio analizando los movimientos del buque en 3D, como se puede ver en la figura 42, utilizando la opción del menú del módulo Motions "*Analysis*" - "*Calculate free surface*" - "*regular wave surface*" - "*Encouter*" dentro de esta opción se puede elegir la frecuencia del oleaje en rad/s - "*Wave Amplitud*" esta otra opción permite elegir la amplitud de la ola.

El estudio se puede realizar eligiendo la frecuencia del oleaje que va desde -30 rad/s a 3 rad/s. La prueba en 3D que corresponde a la figura 64, se ha realizado con una frecuencia de $\omega=0,347$ rad/s, porque simula una posible situación real en la que se pone a prueba el buque, con una amplitud de ola de $h= 10$ m. Se puede afirmar que, el buque supera las expectativas.

En la figura 42 en 3D, se muestra el buque del trabajo con un calado de $D= 18,16$ m en un sistema de olas cuya altura es de $h= 10$ m.

La zona más oscura de la imagen corresponde a la cresta de la ola y la zona más clara al valle. Los movimientos que más se aprecian son el de cabeceo, debido a la dirección de las olas, el cual no supone un riesgo para su estabilidad. Además, también se puede comprobar que en estas condiciones no existe embarque de agua en cubierta por la proa, debido a la altura y frecuencia de las olas. El agua que embarca a bordo debido de las olas, cabeceo, balance etc puede ocasionar daños a la estructura de cubierta debido a la fuerza y al peso con la que embarca está.

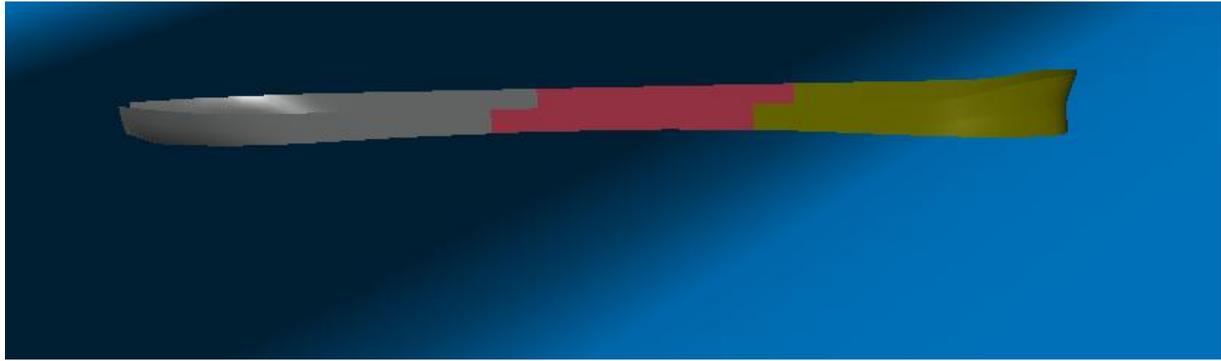


Figura 42. Vista en 3D del buque, con oleaje de proa de $h=10\text{m}$.

Una vez visto el caso 1 sobre los efectos del oleaje, se continúa el análisis, pero en el caso siguiente el buque recibe las olas por la amura.

Caso II, el buque recibe las olas en dirección 135°

Esta situación se muestra en la figura 43, donde se puede observar la influencia del oleaje sobre el buque cuando recibe las olas por la amura, a una velocidad de $V_s=15$ nudos.

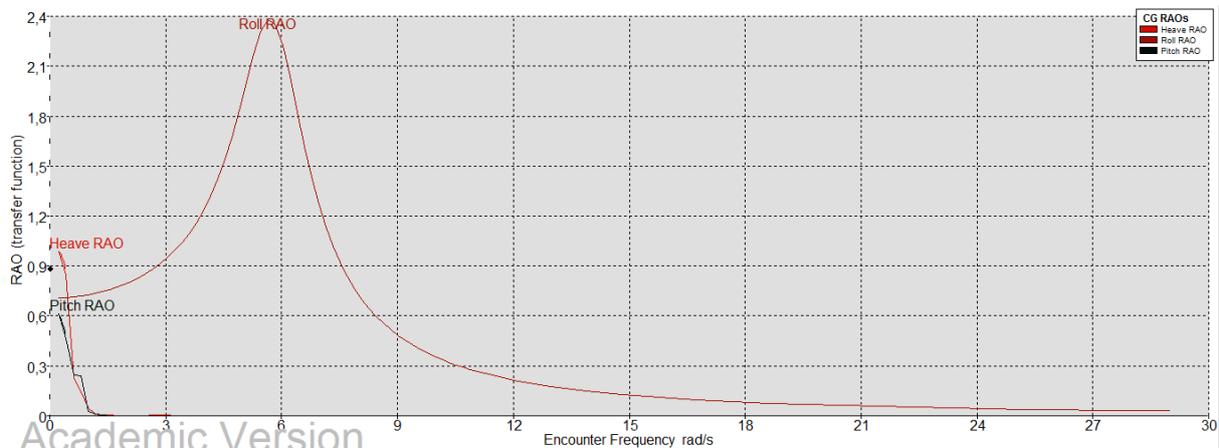


Figura 43. Efecto del oleaje por la proa

Tanto las características principales del buque, como la velocidad de éste, son determinantes en el resultado de las pruebas que se han realizado en el simulacro de canal de experiencias.

La velocidad del buque influye considerablemente en el resultado de su efecto sobre el periodo de encuentro de las olas. En el caso de que el buque del proyecto recibiera las olas por el través, la influencia de éstas no es notable. En cambio, sí es de gran importancia la longitud del buque, cuando éste recibe las olas por la aleta o amura, ya que la respuesta de este tipo de oleaje depende de la longitud del buque.[15,16]

Cuanto mayores sean las frecuencias de las olas, menos afectaran al buque, debido a su gran eslora, las olas se cancelan a lo largo de ella, como se puede apreciar en la gráfica. La curva *Roll* RAO, muestra la evolución del balance del buque, que depende de la frecuencia de las olas. Debido a las características del buque, eslora, manga, velocidad, etc las frecuencias que influyen en su balance oscilan entre $\omega = 0$ rad/s a 6 rad/s, donde alcanza su máximo valor. En el caso de un buque de menor eslora, las altas frecuencias influirían más en su balance.

Otro movimiento que se produce cuando el buque recibe las olas por la amura, es el de arfada o *heave*, este movimiento provoca un ascenso y descenso del buque. El efecto del movimiento vertical del buque, es importante tenerlo en cuenta en canales o ríos navegables, debido a que cuando el buque asciende debido a la cresta de la ola no hay problema de calado, pero cuando el buque desciende entonces puede tocar fondo, causando daños a la estructura del casco.

Este movimiento es más notorio cuanto menor es la frecuencia, llevando al valor de la unidad.

Por último, el cabeceo o *pitch* es otro movimiento, que se produce cuando el buque recibe el sistema de oleaje por la aleta o por la amura. Durante el cabeceo el buque puede llegar a embarcar agua en cubierta, cuando la amplitud de las olas alcance su valor máximo. En este caso las pruebas se han realizado con olas de $h = 10$ m y no ocurre, como se puede apreciar en la figura 44, pero podría darse el caso con olas de mayor tamaño.

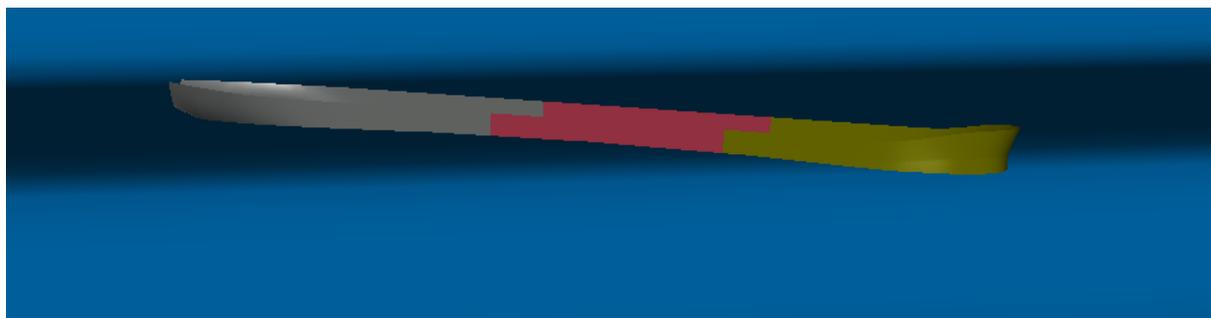


Figura 44. Vista en 3D del buque, con oleaje de proa

Las pruebas y análisis de la figura 44, se han realizado con un calado de $D = 18,16$ m y una frecuencia $\omega = 0,347$ rad/s como se ha comentado anteriormente y se puede concluir que, el buque del proyecto cumple con todas las expectativas del proyecto.

6.- CONCLUSIONES

Tras realizar el estudio hidrodinámico y de estabilidad del buque petrolero con el programa **Maxsurf** se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Con el módulo *Resistance*, se puede calcular con precisión y con el método de análisis adecuado (Holtrop) la resistencia al avance y por tanto, la potencia efectiva necesaria para dimensionar la unidad propulsora (motor, hélice y timón) requerida para la navegación a la velocidad de servicio ($V_s = 15$ nudos)
- Con el módulo *Stability* del programa **Maxsurf** se han logrado distribuir los tanques de carga y estudiar de forma satisfactoria y cumpliendo con los criterios de la OMI la estabilidad del buque en distintas situaciones posibles de servicio.
- Por último, con el módulo *Motions* se han llevado a cabo una serie de pruebas comportamiento en la mar del buque bajo distintas condiciones de altura y frecuencia de ola para confirmar la respuesta del buque ante los movimientos de traslación y rotación.

Para finalizar, cabe destacar que realizar el trabajo fin de grado con el programa **Maxsurf** me ha permitido aplicar y ampliar mis conocimientos de Hidrodinámica y Teoría del buque adquiridos durante el Grado en Náutica y Transporte Marítimo.

7.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Baquero Mayor, A., (2013), "**Resistencia al Avance del Buque**", Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid
- [2] Holtrop, J., (1984), "**A statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data**", International Ship Building Progress, Vol. 31.
- [3] Watson, D. G. M., (1998) "**Practical Ship Design**", Elsevier Ocean Eng. Book series.
- [4] Lamb, Thomas, (2004), "**Ship design and construction**" Ed. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [5] www.marine.sener/es/foran
- [6] www.cintranaval-defcar.com
- [7] www.bentley.com/es/products/brands/maxsurf
- [8] Pereira Bayle, Heber, (1984), "**Teoría del buque**", Ed. La Asunción, Isla Margarita Venezuela.
- [9] Juan-García Aguado, J.M., (1986), "**Principios de teoría del buque dinámica**", Ed. Universidad da Coruña servicios de publicaciones.
- [10] Holivella Puig, J., (2004), "**Teoría del buque, Estabilidad, varada, e inundación**", Universitat Politècnica de Catalunya.
- [11] Marpol 73/78/90, (1973), "**Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques**", impreso por Organización Marítima Internacional.
- [12] Convenio Internacional para la seguridad de la vida humana en la mar, (2002), "**SOLAS**", Impreso por Organización Marítima Internacional 24681097531, ISBN 92-801-3541-4.
- [13] Bureau Veritas, (2015), "**Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers**", Rule Note NR 606 DT R00 E, Marine & Offshore Division.
- [14] International Maritime Organization, (1993), "**Código de estabilidad sin avería para todos los tipos de buques recogidos por los instrumentos de la OMI**", Resolución A 749 (18)
- [15] Briggs, Michael J., Maynard, Stephen T., Nickles, Charles R., Weller, Terry N., (2004) "**Charleston harbor ship motion data collection and squat analysis**", ERDC/CHL CHETN-IX-14.
- [16] Korvin-Kroukowsky, B., and W. Jacobs, (1957), "**Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves**", SNAME Transactions.

- [17] Briggs, Michael J., Melito, I., Demirbilek, Z., Sargent, F., (2001), "**Deep-draft entrance channels: primary comparisons between field and laboratory measurements**", Coastal and Hidraulics Engineering Technical Note, CHETN -IX-7 U.S., Army Engineer Reseach and Development Center, Vicksburg, MS
- [18] Torroja Méndez, Jaime, (1987), "**Apuntes de proyectos**", Volumen 1, Departamento de publicaciones de la Escuela Técnica Superior Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid.
- [19] Castro, A., Azpiroz Azpiroz, R., Meizoso Fernandez, J.J., (2007), "**Proyecto Básico del Buque Mercante**", Colegio Oficial de Ingenieros Navales, Madrid.
- [20] Vaquero, A., (2003), "**Teoría del buque**", Introducción a la propulsión de buques, Departamento de Artes Gráficas, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid.
- [21] Pérez, G., (2002) "**Teoría del buque sección Maquinas**", Escuela Técnica de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid, Tomo II-B.
- [22] Holtrop, J., and Mennen, G.G.J., (1982), "**An approximate power prediction method**", Shipbuilding Progress, Vol 29.
- [23] www.marine.man.eu
- [24] Lloyd's Register of Shipping, (2006) "**Rules and Regulations for the Clasification of Ships**" (CD) FNB.
- [25] Baquero Mayor, A., (2014), "**Maniobrabilidad del Buque**" Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid.
- [26] Det Norske Veritas, (2000), "**Rules for Classification of Ships Newbuilding Hull and Equipment Main Class**", Printed in Norway by GCS AS.
- [27] Yilmaz, H., Güner, M., (2001) "**An approximate method for cross curves of cargo vessels**", Marine Technology, Vol. 38.