



## TRABAJO 2: FORMAS Y POTENCIAS

PROYECTO DEL BUQUE Y ARTEFACTOS NAVALES

### Descripción breve

Diseño preliminar de un buque que incluye: modelado del casco en Maxsurf, estimación de la resistencia al avance con el método de Holtrop, cálculo del diámetro máximo de la hélice con plano de popa, selección de una hélice serie B y elección de un motor propulsor adecuado

### Grupo 9:

Israel Martínez Moreno  
Jannat Haskouri EL Azzaoui  
Alex Araujo  
Cèlia Vélez  
Gerard Perez Torres  
Marc Calveras  
Robert Garabán Garcías

**A. Utilizando Maxsurf, derivar unas formas del buque, aproximando de la manera más precisa posible las dimensiones principales y los coeficientes de forma obtenidos anteriormente. La derivación de formas se realizará mediante transformación paramétrica, de modo que se puede partir de cualquiera de los cascos de ejemplo del programa Maxsurf o de cualquier otra geometría disponible.**

Para desarrollar este apartado se empleará el software Maxsurf Modeler, una herramienta especializada en el diseño y modelado tridimensional de cascos de buques.

Al iniciar la aplicación, se selecciona uno de los modelos predeterminados disponibles en la biblioteca del programa. En este caso, se opta por el modelo “**Cargo Vessel**”, por ser el que mejor se ajusta a las características hidrodinámicas y volumétricas de un buque quíquero destinado al transporte de hidrocarburos a granel.

Esta elección permite disponer de una base geométrica adecuada sobre la cual aplicar transformaciones paramétricas que ajusten las formas del casco a las dimensiones principales y coeficientes de bloque previamente determinados. De este modo, se obtiene un modelo tridimensional con un equilibrio entre capacidad de carga, eficiencia hidrodinámica y estabilidad inicial, adecuado para posteriores etapas de análisis estructural e hidrostático.

Una vez seleccionado el modelo base, se introducen los siguientes datos característicos del buque:

- LOA (Length over all) = Lpp / 0,97 = 103,81m
- Depth = Puntal = 7,7m
- Beam = Manga = 15,60m

A continuación, en el menú “Data”, se accede a la opción “Parametric Transformations”, con el objetivo de ajustar las dimensiones principales del buque al diseño propuesto.

Es fundamental que las modificaciones se realicen de forma gradual y progresiva, ya que la aplicación de cambios bruscos podría generar inconsistencias geométricas o discontinuidades en la superficie del casco.

Una vez completados los ajustes, estos deben validarse mediante la función “Search”, que permite al programa efectuar un reajuste automático de los parámetros y determinar la configuración óptima de la geometría del casco.

En este caso, tras la aplicación de las transformaciones paramétricas, se obtuvieron los siguientes resultados geométricos finales:

Measurement	Value	Unit
1 Displacement	7028213	kg
2 Volume (displaced)	6856,793	m <sup>3</sup>
3 Draft Amidships	6,477	m
4 Immersed depth	6,476	m
5 WL Length	96,948	m
6 Beam max extents on WL	15,545	m
7 Wetted Area	2270,459	m <sup>2</sup>
8 Max sect. area	98,053	m <sup>2</sup>
9 Waterpl. Area	1325,413	m <sup>2</sup>
1 Prismatic coeff. (Cp)	0,721	
1 Block coeff. (Cb)	0,703	
1 Max Sect. area coeff. (Cm)	0,982	
1 Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,879	
1 LCB length	-51,233	fro
1 LCF length	-53,605	fro
1 LCB %	-52,846	fro
1 LCF %	-55,293	fro
1 KB	3,578	m
1 KG fluid	6,477	m
2 BMT	3,582	m
2 BML	121,702	m
2 GMT corrected	0,683	m
2 GML	118,803	m
2 KMT	7,159	m
2 KML	125,279	m
2 Immersion (TPc)	13,585	tonn
2 MTC	83,496	tonn
2 RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	83755,226	kg.
2 Length:Beam ratio	6,237	

Imagen 1: Resultados Excel

Posteriormente, se verifica la coherencia de los resultados obtenidos en Maxsurf comparándolos con los valores previamente calculados en la hoja de cálculo de Excel. Esta comprobación permite confirmar que las dimensiones principales y los coeficientes de forma derivados del modelo tridimensional son consistentes con los parámetros teóricos iniciales, garantizando así la validez geométrica y numérica del casco generado.

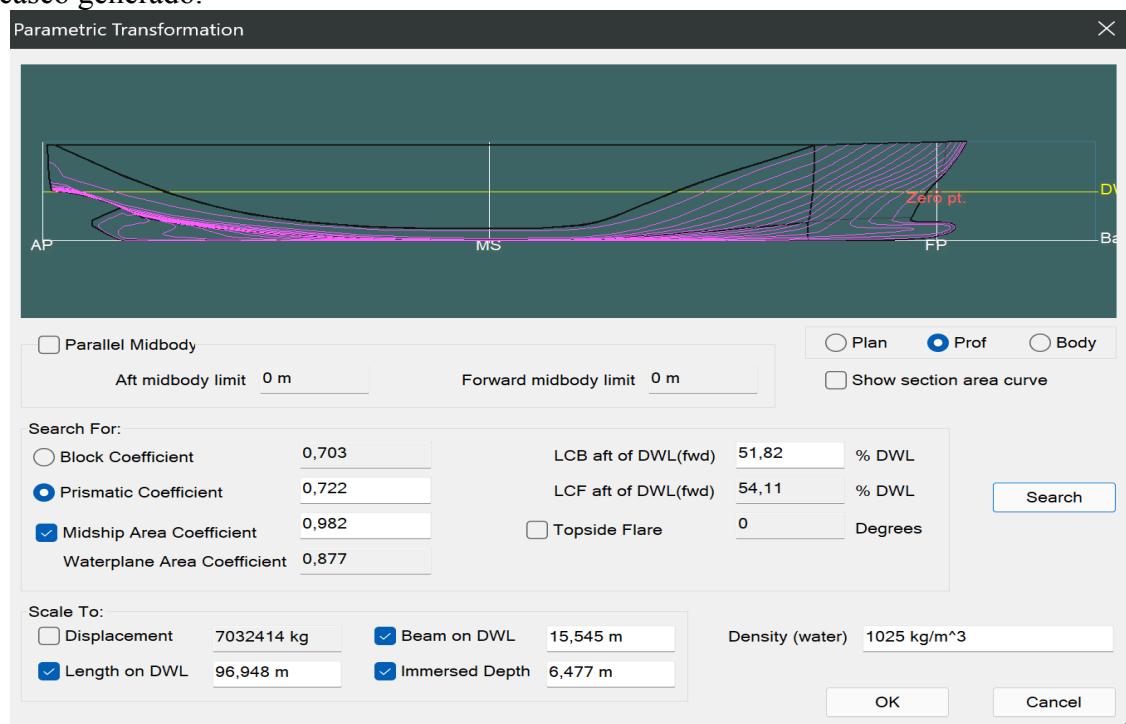


Imagen 2: Resultados Maxsurf 1

Finalmente, el modelo queda definido de la siguiente manera:

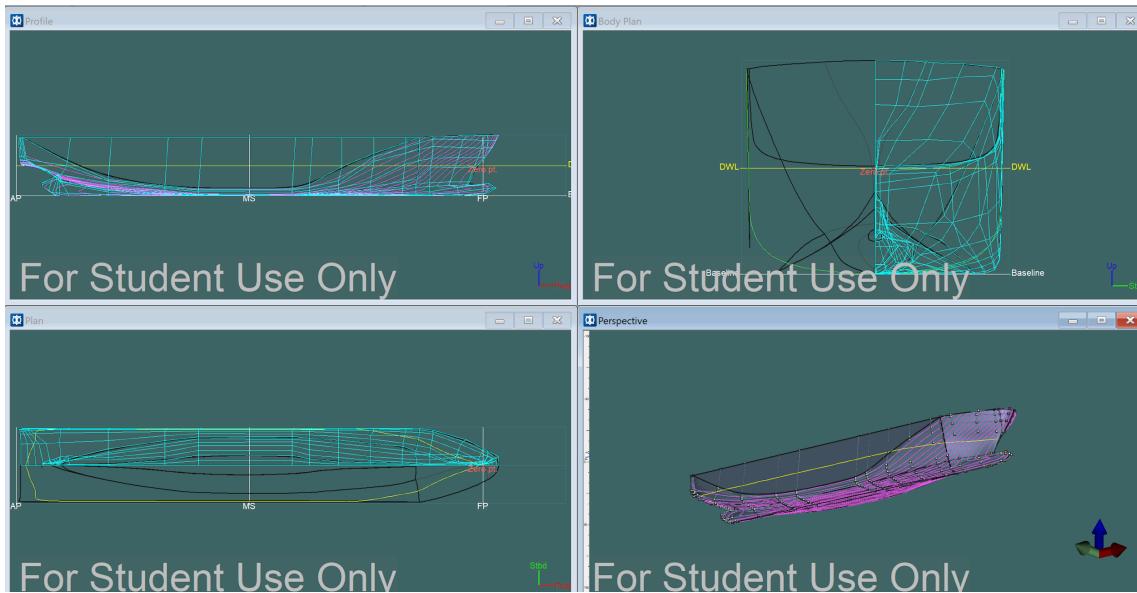


Imagen 3: Resultados Maxsurf 2

### B. Estimar, mediante el método de Holtrop, la curva de resistencia al avance del buque hasta su velocidad de servicio.

Una vez definido el modelo de formas del buque, se procede al análisis de su comportamiento hidrodinámico. Para ello, se aplica el método de Holtrop y Mennen, el cual se fundamenta en un conjunto de ecuaciones empíricas y coeficientes de corrección derivados de estudios experimentales sobre cascos de geometría variada (Maxsurf Modeler). Este método permite estimar con buena aproximación la resistencia total al avance de un buque en función de sus características principales y condiciones de operación.

En esta etapa, los datos geométricos obtenidos del modelado se transfieren al módulo Maxsurf Resistance, donde se lleva a cabo el cálculo de la resistencia al avance para una velocidad de servicio de 14,5 nudos.

El resultado del cálculo arroja una resistencia total de 233,80 kN, valor que se considera coherente con las proporciones y el desplazamiento del buque modelado, confirmando la validez del diseño hidrodinámico inicial.

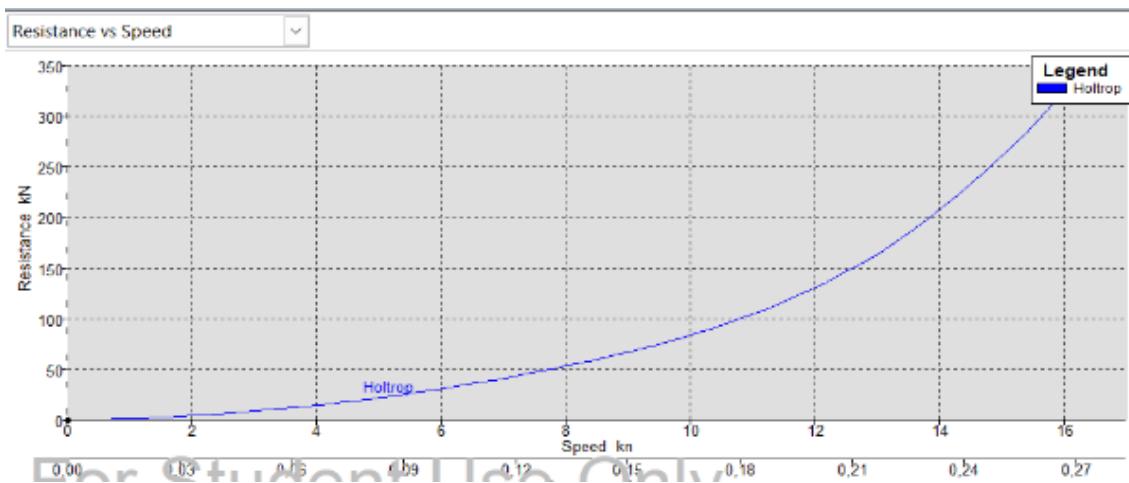


Imagen 4: Gráfico resistencia/velocidad

Estos resultados permiten verificar la concordancia entre los cálculos realizados previamente en Excel y los obtenidos mediante Maxsurf Resistance.

A través de la gráfica Speed/Resistance, que representa la relación entre la velocidad del buque y su resistencia al avance, se observa que, a medida que aumenta la velocidad, el coeficiente de resistencia de Holtrop también se incrementa.

Este comportamiento confirma la coherencia y validez de los resultados, validando tanto la metodología empleada como la precisión de los parámetros geométricos utilizados en el modelo.

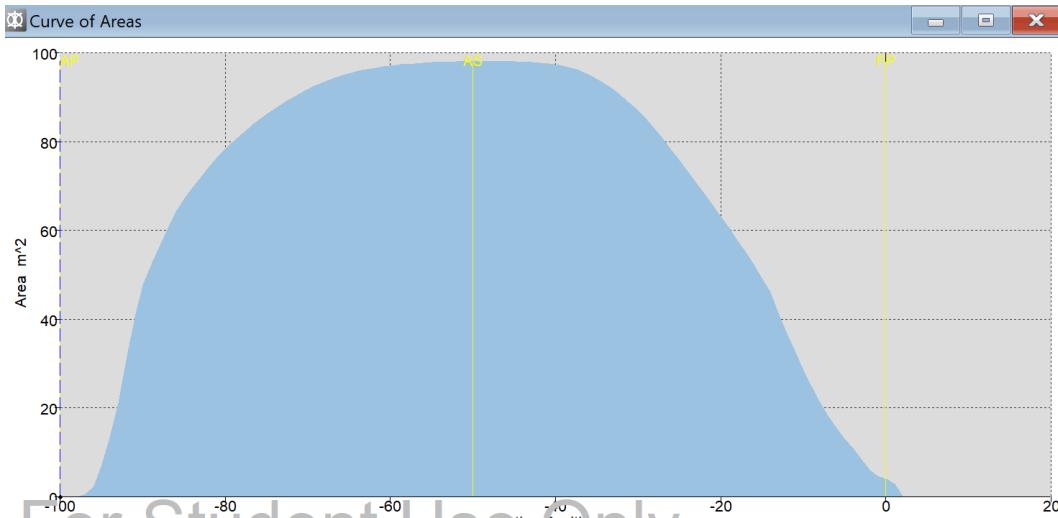


Imagen 5: Curva de Áreas

La curva de áreas muestra de forma gráfica cómo se distribuye longitudinalmente el volumen de carena (es decir, el área comprendida bajo la curva). Esta debe presentar contornos suaves y continuos, sin cambios bruscos de forma. La configuración de la curva de áreas de cuadernas es fundamental para lograr una resistencia adecuada y un buen comportamiento del buque en el mar. En nuestro caso, al tratarse de un buque

lento, la popa presenta una forma más recta, lo que provoca una caída pronunciada en la gráfica.

A continuación, mostramos los datos obtenidos en el excel proporcionado, en las siguientes tablas.

Datos del buque		
Eslora entre perpendiculares (m)	L	100,7
Manga (m)	B	15,6
Calado en la PP de proa (m)	Tf	6,6
Calado en la PP de popa (m)	Ta	6,6
Calado medio (m)	T	6,6
Volumen de carena (m <sup>3</sup> )	Vol	7348,59
Xcc en % de L a proa de 0,5 L (lcb)	Xcc	2,09
Superficie mojada estimada (m <sup>2</sup> )	S	2375,8
Superficie transversal del bulbo (m <sup>2</sup> )	Abt	17,1
Altura centro bulbo (m)	hb	4
Coeficiente de maestra	Cm	0,972
Coeficiente de flotación	Cwp	0,944
Superficie del espejo (m <sup>2</sup> )	At	0
Superficie de los apéndices (m <sup>2</sup> )	Sapp	0
Coeficiente de formas de la popa	Cstern	5
Velocidad kn	V	14,5

Resultados de resistencia		
Resistencia viscosa	Cv	134,75
Resistencia de apéndices	R <sub>app</sub>	0,00
Resistencia por formación de olas	R <sub>w</sub>	74,10
Resistencia del bulbo	R <sub>B</sub>	68,45
Resistencia del espejo	R <sub>TR</sub>	0,00
Resistencia por la relación modelo-buque	R <sub>A</sub>	35,17
Resistencia Total (kN)	R <sub>total</sub>	312,47
Potencia Remolque (CV)	EHP	3128,39
Potencia Remolque (kW)	EHP	2330,65

### C. Estimar el diámetro máximo de la hélice. Justificarlo con un plano de las formas de popa, donde se indiquen los espacios entre la hélice, el codaste y la línea base.

Para estimar el diámetro máximo de la hélice, se debe tener en cuenta la distancia entre la línea de flotación y la parte inferior del codaste.

En nuestro caso, este valor se determina a partir del diseño del buque. Como se aprecia en la imagen, el diámetro máximo es de 4,4 metros.

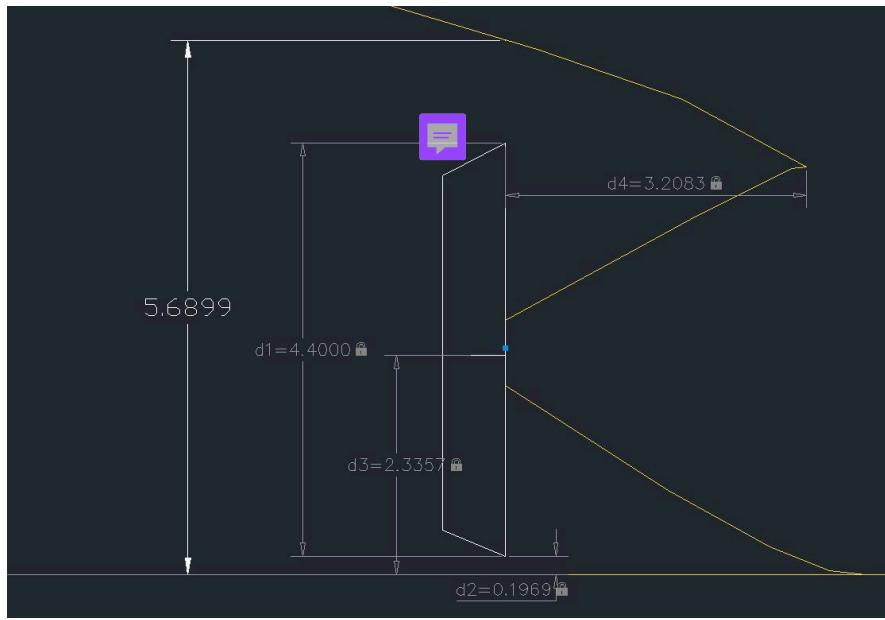


Imagen 6: Espacio libre popa

Los datos de la hélice que hemos determinado son:

Datos de la propulsión (una hélice)		
Diámetro (m)	D	4,4
Número de palas	Z	5
Huelgo del propulsor con la línea base		0,1969
Altura del eje desde la línea base (m)	ho	2,33
Rendimiento de la hélice	$\eta_o$	0,71
Rendimiento mec. de la línea de ejes	$\eta_m$	0,99
Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_o$	1025
Aceleración de la gravedad (m/s <sup>2</sup> )	g	9,81
Viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)	$\nu$	1,19E-06
$p_0-p_v$ (Pa)	$p_0-p_v$	143488,42

#### D. Seleccionar una hélice óptima de la serie B. Indicar el diámetro, el número de palas y la relación de áreas de la hélice.

El proceso de selección de la hélice óptima de la serie B podría seguir los siguientes pasos:

1. Fijar el número de palas de la hélice y el diámetro en función del espacio máximo disponible en el codaste del buque, tal como se realizó en el paso anterior.
2. Establecer una relación AE/AO máxima.

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{(1.3 + 0.3 \cdot Z) \cdot T}{(p_0 - p_v) \cdot D^2} + K$$

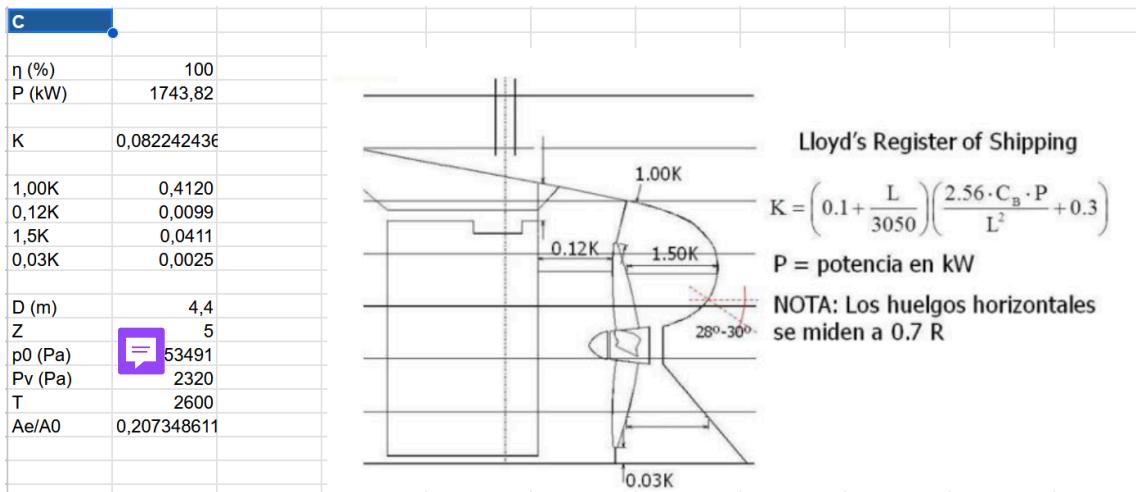


Imagen 7: Resultados Helice

3. Elegir un valor tentativo del número de revoluciones de giro de la hélice y calcular el grado de avance (J) para ese punto de funcionamiento, así como los valores iniciales de los coeficientes KT y KQ, mediante la evaluación de los correspondientes polinomios de la serie B.

4. Llegados a este punto, el proceso continúa de forma iterativa, buscando la combinación de J y P/D que proporcione el mayor rendimiento y genere el empuje deseado.

$$\eta_o = \frac{V_A \cdot T}{2\pi \cdot n \cdot Q} = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q}$$

En nuestro caso, con el archivo de Excel “Serie B”, podemos determinar todos los datos necesarios rellenando el apartado en azul con la información extraída del Maxsurf.

### Cálculos Serie B

<b>Datos de la hélice</b>		<b>Datos del buque</b>	
AE/AO	0,57	R	1743,820 kN
Z	5	t	0,24
D	4,4 m	w	0,160
P/D	1,300	$\eta_m$	0,990
n	220,0 rpm	$\eta_{rr}$	0,940
KT	0,4522	V	14,5 kn
T	2333,3 KN	T	2294,5 kN
KQ	0,0838		
Q	1902,6 KN·m	<b>Propiedades físicas</b>	
J	0,388	$\rho$	1024,000 kg/m <sup>3</sup>
$\eta_0$	0,3335	$\mu$	0,0012 Pa·s
C <sub>0.75</sub>	1,0318 m		
V <sub>0.75</sub>	38,7 m/s		
R <sub>n</sub>	3,41E+07		
BHP	47102,3 kW		

Imagen 8: resultados excel Serie B

Sabemos que esta hélice genera un empuje de 2.333 N, el cual es superior a los 2.294,5 N requeridos; por lo tanto, nuestra elección es correcta.

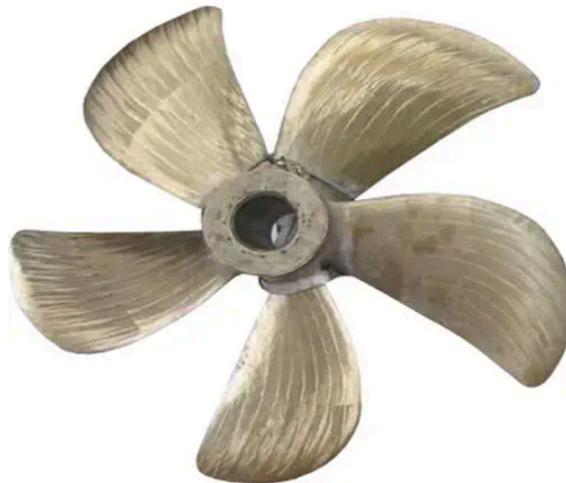


Imagen 9: Hélice para buques de 5 palas, de tamaños desde 0,5m hasta 12m

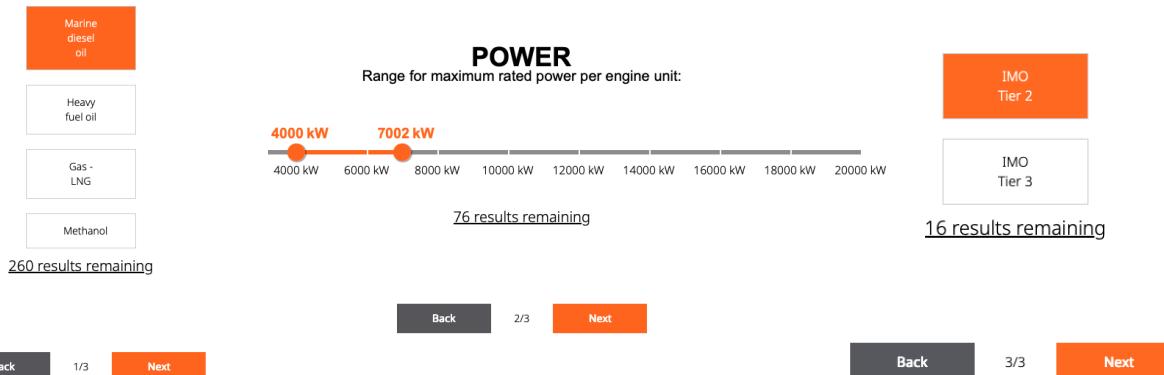
### E. Seleccionar un motor propulsor adecuado para el buque.

Motor propulsor :

Nos ayudamos de la serie de motores que hay disponible en <http://www.wartsila.com>, donde a través de un formulario se filtran las diferentes opciones recomendadas

## FUEL TYPE

## EMISSION



## RESULTS

	Wärtsilä 12V26	Wärtsilä 16V26	Wärtsilä 8V31	Wärtsilä 10V31	Wärtsilä 7L32	Wärtsilä 8L32	Wärtsilä 9L32	Wärtsilä 12V32
<b>Application</b>	Mechanical propulsion & CPP							
<b>Fuel type</b>	Marine diesel oil							
<b>Power</b>	4080 kW	5440 kW	5200 kW	6500 kW	4060 kW	4640 kW	5220 kW	6960 kW
<b>Emission</b>	IMO Tier 2							
<b>Speed</b>	1000 rpm	1000 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm

La potencia propulsiva que se debe instalar en el buque viene entonces definida por:

$$BHP = EHP / \eta p = R \cdot V / \eta p$$

Donde V es la velocidad de proyecto, y R es la resistencia al avance para esa velocidad. Una vez calculada la potencia propulsiva necesaria para la condición de navegación especificada, se habrá de elegir el motor propulsor, dentro de la gama disponible.  $\eta p$  es el rendimiento propulsivo.

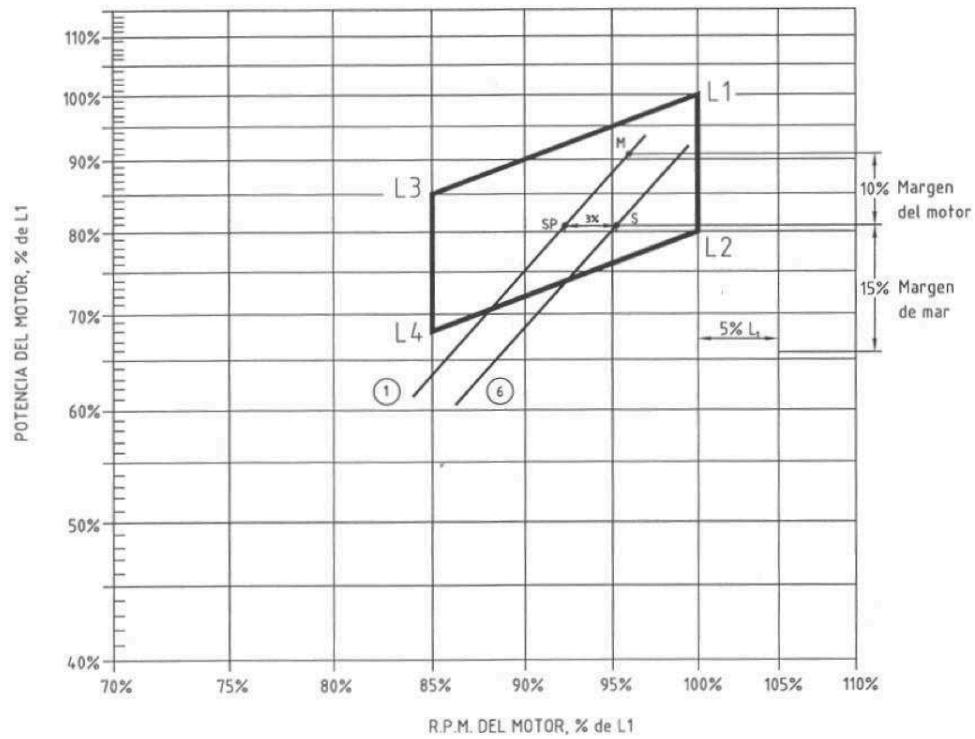
$$\text{BHP} = 47102,3 \text{ KW}$$

NOTA: nos damos cuenta que el valor que toma nuestro BHP es elevado ya que deberíamos esperar uno del orden de  $10^3$ . Procedemos entonces a revisar los cálculos realizados en la serie B, donde el BHP es calculado a través de tres datos: Z que es el número de palas, n que equivale a las revoluciones por minuto y KQ que es el coeficiente desde la quilla hasta el punto Q y ha sido calculado a través de la sección KQ dentro del excel de la serie B. El valor obtenido de

BHP es igual a 47102,3 kW, el único dato que puede resultar en un BHP erróneo es el KQ pero no conseguimos localizarlo. Le pediríamos que nos ayude a identificarlo para así poder enmendarlo. Hemos tomado la decisión de realizar el cálculo del dimensionamiento de la unidad propulsiva con BHP = 4710,23

La potencia deberá aumentarse en aquellos casos en los que se desee incorporar alguna toma de potencia adicional como PTO (Power Take Off). Por otra parte la potencia pico del motor propulsor que se instalará deberá superar en un 15% (aproximadamente) la potencia calculada, con el objetivo de que la situación de navegación en mar se cumplan los criterios de velocidad exigidos (margen de mar). Asimismo se acostumbra a aumentar en un margen del 10% adicional el valor de la potencia instalada, para disminuir los costes de mantenimiento del motor.

A continuación se determinarán los puntos M, S y SP



- La línea 1 corresponde a la Potencia sucia
- La línea 6 corresponde a la Potencia limpia
- El Punto S, sobre la línea 6, corresponde a 4710,23 kW.
- El punto SP corresponde a 4851,537 kW en la línea 1.
- El punto M (punto de selección de motor) se obtiene aumentando un 10% la potencia absorbida a partir del punto SP, kW + 10 %, dando como resultado 5336,69 kW.

Una vez identificados todos los puntos, se procederá a seleccionar un motor que se ubique dentro del cuadrilátero definido por los puntos (L1, L2, L3, L4) y que esté lo más cercano posible a L1, lo que garantizará un rendimiento óptimo del motor.

El siguiente paso consiste en elegir un motor. Es importante que el número de cilindros no sea múltiplo de cinco, que es el número de palas de la hélice, para evitar posibles vibraciones torsionales y sincronismos indeseados provocados por el empuje axial de las palas.

	Wärtsilä 12V26	Wärtsilä 16V26	Wärtsilä 8V31	Wärtsilä 10V31	Wärtsilä 7L32	Wärtsilä 8L32	Wärtsilä 9L32	Wärtsilä 12V32
Application	Mechanical propulsion & CPP							
Fuel type	Marine diesel oil							
Power	4080 kW	5440 kW	5200 kW	6500 kW	4060 kW	4640 kW	5220 kW	6960 kW
Emission	IMO Tier 2							
Speed	1000 rpm	1000 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm	750 rpm

Hemos seleccionado el motor Wärtsilä 16V26 que con 5440 kW supera ligeramente el punto M calculado.

## **CONCLUSIÓN**

En este proyecto, se ha logrado diseñar un buque optimizado para una propulsión eficiente. Usando Maxsurf para el modelado del casco y el método de Holtrop y Mennen, conseguimos una resistencia al avance de 2294.5 kN a 14.5 nudos.

La hélice seleccionada tiene 5 palas y una relación área expandida-área disco ( $A_e/A_o$ ) de 0.57, lo que ayuda a reducir la cavitación y mejorar la eficiencia. Finalmente, optamos por el motor Wärtsilä 16V26, que entrega 5440 kW a 1000 rpm, ajustado con una caja reductora de 0.22 para alcanzar la velocidad de hélice óptima.