

# DISEÑO DE UN YATE HÍBRIDO

## Trabajo Final de Grado



Facultad de Náutica de Barcelona  
Universidad Politécnica de Cataluña

Trabajo realizado por:  
**Guillem Bausà García**

Dirigido por:  
**Sergio Iván Velasquez Correa**

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, Julio de 2019

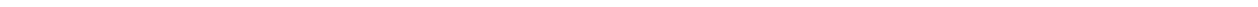
Departamento de Ciencia e Ingeniería Naval



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona







---

# Agradecimientos

A mi tutor, el Sr. Sergio Iván Velasquez, profesor del Departamento de Ingeniería Naval de la Facultad de Náutica de Barcelona, UPC.

A mi familia, por el apoyo durante todos los aspectos de la vida y especialmente en los estudios.

A la empresa Solé Diesel, por proporcionarme su ayuda y conocimientos necesarios en todo momento para la realización del proyecto.



---

# Resumen

La razón de este proyecto es estudiar mediante un diseño preliminar una embarcación de recreo tipo *Hard Top* de 13,5 metros de eslora y propulsada mediante propulsión híbrida.

La primera consideración para realizar el estudio, es diseñar un prototipo de casco para conocer la resistencia al avance y, de esta manera, calcular la potencia requerida por la embarcación. Para ello, es necesario analizar los distintos modelos que hay en el mercado y partir de unas dimensiones iniciales de referencia. A partir de la estimación de los datos iniciales, se estudiará la geometría del casco y posteriormente el sistema propulsivo, donde se valorará la viabilidad del sistema propulsivo híbrido comparación con la propulsión convencional.

Todo ello, con el objetivo de llevar a término un proyecto de yate híbrido que cumpla con los requisitos mínimos de navegabilidad, calidad y seguridad, impuestos por la normativa, de manera que el diseño propuesto sea viable en un futuro no muy lejano.

## Abstract

The objective of this project is to study, through a preliminary design, a 13.5-meter Hard Top pleasure craft propelled by hybrid propulsion.

The first consideration to carry out the study is to design a prototype hull to know the ship resistance and, in this way, calculate the power required by the boat in terms of propulsion need. For this, it is necessary to analyze the different models that are in the market and start from initial reference dimensions. From the estimation of the initial data, the geometry of the hull and later the propulsive system will be studied, where the viability of the hybrid propulsive system will be assessed in comparison to the conventional propulsion.

All this, with the objective of carrying out a hybrid yacht project that meets the minimum requirements of navigability, quality and safety, imposed by the regulations, so that the proposed design is viable in the not too distant future.



---

# Tabla de Contenidos

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
TABLA DE CONTENIDOS	VII
LISTADO DE FIGURAS	IX
LISTADO DE TABLAS	XI
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO	2
<b>CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE MERCADO</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 3. ANTEPROYECTO</b>	<b>4</b>
3.1. DATOS PRINCIPALES	4
3.1.1. MEDICIONES LONGITUDINALES	4
3.1.2. MEDICIONES TRANSVERSALES	5
3.1.3. MEDICIONES VERTICALES	6
3.2. BASE DE DATOS	7
3.3. DIMENSIONAMIENTO BÁSICO	8
3.3.1. ESTUDIO DE REGRESIONES LINEALES	8
<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL CASCO</b>	<b>18</b>
4.1. DIMENSIONAMIENTO DEL CASCO	18
4.2. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA POTENCIA REQUERIDA	22
<b>CAPÍTULO 5. SISTEMA PROPULSIVO</b>	<b>26</b>
5.1. SISTEMA DE PROPULSIÓN IPS	26
5.2. ANÁLISIS DE LAS CONFIGURACIONES HÍBRIDAS EXISTENTES	28
5.3. ESTUDIO Y CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	30
5.4. ELECCIÓN DEL SISTEMA PROPULSIVO	35
5.5. ELECCIÓN DEL MOTOR ELÉCTRICO	36

---

<b>CAPÍTULO 6. BANCOS DE BATERÍAS</b>	<b>38</b>
6.1. CONFIGURACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS BATERÍAS	38
6.2. CÁLCULO DE BATERÍAS	39
<b>CAPÍTULO 7. VIABILIDAD ECONÓMICA</b>	<b>45</b>
7.1. COSTE DEL SISTEMA PROPULSIVO ELEGIDO	45
7.2. VIABILIDAD ECONÓMICA DEL SISTEMA HÍBRIDO	45
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO 1. GREEN POWER GP75, SCAN DIESEL</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO 2. UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICA, SCAN DIESEL</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO 3. GRÁFICAS MOTOR GP75, SCAN DIESEL</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO 4. GRÁFICAS SISTEMA IPS600.</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO 5. PRECIOS DE VENTA AL PÚBLICO DE VOLVO PENTA</b>	<b>57</b>

---

# Listado de Figuras

Ilustración 1. Dimensiones longitudinales del casco. UNE-EN ISO 8666 Pequeñas Embarcaciones. Datos principales. ....	5
Ilustración 2. Dimensiones transversales del casco. UNE-EN ISO 8666 Pequeñas Embarcaciones. Datos principales. ....	6
Ilustración 3. Dimensiones verticales del casco. UNE-EN ISO 8666 Pequeñas Embarcaciones. Datos principales. ....	6
Ilustración 4. Relación $B_{MAX} = f(LOA)$ . Elaboración propia. ....	9
Ilustración 5. Relación $T_{MAX} = f(LOA)$ . Elaboración propia. ....	10
Ilustración 6. Ilustración 5. Relación $T_{MAX} = f(B_{MAX})$ . Elaboración Propia. ....	11
Ilustración 7. Relación $\Delta = f(LOA)$ . Elaboración propia. ....	12
Ilustración 8. Relación $V_{MAX} = f(LOA)$ . Elaboración propia. ....	13
Ilustración 9. Relación $P = f(LOA)$ . Elaboración propia. ....	14
Ilustración 10. Relación $T_{COMB} = f(LOA)$ . Elaboración propia. ....	15
Ilustración 11. Relación $TAD = f(LOA)$ . Elaboración propia. ....	16
Ilustración 12. Alzado del casco. Elaboración propia. ....	18
Ilustración 13. Perfil del casco. Elaboración propia. ....	19
Ilustración 14. Planta del casco. Vista de la obra viva. Elaboración propia. ....	19
Ilustración 15. Método de Holtrop y Savitsky Pre-Planning. Elaboración Propia. ....	24
Ilustración 16. Método de Savitsky Pre-Planning y Savitsky Planning. Elaboración Propia. ....	24
Ilustración 17. Sistema Volvo Penta IPS. Fuente: Página web de Volvo Penta. ....	26
Ilustración 18. Hélices contrarrotantes orientadas a proa. Fuente: Página web de Volvo Penta. ....	27
Ilustración 19. Elementos del sistema híbrido en serie. Fuente: Página web de Náutica y Yates. ....	28
Ilustración 20. Sistema de propulsión híbrido en paralelo. Fuente: Página web de Náutica y Yates. ....	29
Ilustración 21. Funcionamiento de un motor eléctrico. Fuente: Conceptos Básicos de Máquinas de corriente continua. Mariano Alfonso Pernia (Octubre, 2011). ....	30
Ilustración 22. Funcionamiento Motor de Corriente Continua. Fuente: Página web Wikipedia. ....	32

Ilustración 23. Motor síncrono de imán permanente. Fuente: Página web de monografías. ....	33
Ilustración 24. Motor de Imanes Permanentes frente a un Motor de Inducción. Fuente: Revista Electro Industria. ....	35
Ilustración 25. Sistema propulsión híbrido propuesto. Fuente: Página web de Volvo Penta. ....	36
Ilustración 26. Montaje Motor GP75. Fuente: Documentación de Scan Diesel. ....	36
Ilustración 27. Unidad de control electrónica. Fuente: Documentación de Scan Diesel. ....	37
Ilustración 28. Batería de Gel de 225Ah y 12V. Fuente: Página web de Whisper Power. ....	41
Ilustración 29. Gráfica KW - RPM del motor GP75. Fuente: Documentación de Scan Diesel. ....	42
Ilustración 30. Gráfica Empuje - RPM del motor GP75. Fuente: Documentación de Scan Diesel. ....	43
Ilustración 31. Batería Deep Blue BMWi3. Fuente: Página web de Torqeedo. ....	44
Ilustración 32. Consumo de combustible de los sistemas IPS. Fuente: Documentación de Volvo Penta. ....	46
Ilustración 33. Relación Potencia-RPM de los sistemas IPS. Fuente: Documentación de Volvo Penta. ....	46
Ilustración 34. Precios al consumidor de productos petrolíferos en España. Fuente: Página web de Datos Macro. ....	47

---

# Listado de Tablas

Tabla 1. Embarcaciones de recreo vela contra motor. Elaboración propia.....	3
Tabla 2. Esloras de las embarcaciones de recreo. Elaboración propia.....	3
Tabla 3. Base de datos. Embarcaciones que la confeccionan. Elaboración propia. ....	7
Tabla 4. Parámetros de diseño. Elaboración propia. ....	17
Tabla 5. Comparativa de diseño. Elaboración propia. ....	17
Tabla 6. Comparativa entre dimensiones. Elaboración propia.....	20
Tabla 7. Condiciones Hidrostáticas. Elaboración Propia.....	21
Tabla 8. Número de <i>Froude</i> frente velocidad. Fuente: Elaboración propia. ....	23
Tabla 9. Métodos de estimación de la Potencia requerida. Elaboración propia.....	25
Tabla 10. Equipos de la instalación eléctrica básica. Fuente: Elaboración propia.....	40
Tabla 11. Presupuesto del sistema híbrido. Fuente: Elaboración propia. ....	45



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

## 1.1. Introducción

Este proyecto desarrolla el estudio de una embarcación de recreo tipo *Hard Top* de 13,5 metros de eslora propulsada mediante un sistema propulsivo híbrido existente en el mercado actual y su viabilidad económica.

La mayoría de estas embarcaciones funcionan con motores intraborda de combustión interna, lo que supone una fuente de contaminación atmosférica debido al uso de combustible diesel. En el mundo de la automoción, los estados de Europa ya han tomado medidas para reducir las emisiones atmosféricas actuando sobre los vehículos de gasoil y, solo es cuestión de tiempo que lleguen dichas medidas en la industria naval. Por ejemplo, el parlamento noruego ha tomado medidas para poner fin a las emisiones de las embarcaciones de crucero y los ferris en los fiordos noruegos, declarados Patrimonio de la Humanidad, por lo que estos se convertirán en zonas de cero emisiones en 2026 y solo podrán acceder a ellas los barcos eléctricos.

Por todo ello, en este proyecto se ha propuesto el análisis de la viabilidad, tanto de funcionamiento como económica, de la propulsión híbrida en una embarcación de recreo con los sistemas que hay actualmente en el mercado.

Para realizar el proyecto, se analizarán las embarcaciones existentes en el mercado con características similares a la embarcación a proyectar, para así poder obtener los datos del diseño preliminar. Así pues, el proyecto consta de varias fases; estudio de mercado, diseño de la geometría del casco, estudio de potencia requerida por la embarcación, determinación del sistema propulsivo y análisis de los sistemas híbridos existentes en el mercado, cálculo de baterías y la viabilidad económica del sistema propulsivo frente al sistema convencional.

Para ello, se ha seguido el procedimiento utilizado para el diseño de la mayoría de embarcaciones existentes en el mercado, la espiral de diseño. Centrando el proyecto en la primera vuelta de la espiral y sobre todo en la fase de la determinación del sistema propulsivo.

## 1.2. Objetivo del proyecto

El objetivo del proyecto es el diseño preliminar de una embarcación de recreo de 13,5 metros de eslora y propulsada mediante algún sistema híbrido que se presente viable en el mercado actual.

Se pretende proyectar el pre-diseño de una embarcación tipo *Hard Top* con una velocidad de entre 30 y 35 nudos y de categoría B, propulsada mediante un sistema alternativo al convencional centrándose en un sistema híbrido eléctrico. El objetivo principal del modelo, es que la embarcación pueda navegar con un sistema alternativo al convencional para reducir emisiones contaminantes y que sea viable con las oportunidades que se presentan ahora mismo en el mercado.



## CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE MERCADO

El primer paso para tratar con proyecto de cualquier tipo, es determinar cuáles son las características que lo identifican y comprender a qué tipo de usuarios podría interesarle. Este proceso permite proceder con el diseño sin descuidar ninguno de los aspectos que harán que el proyecto sea competitivo en el mercado.

Para un proyecto complicado, como es el diseño de una embarcación de recreo, es importante establecer unas características de diseño que apunten al sector de mercado correcto en el que se debe centrar el desarrollo del modelo. Para ello, se han analizado los datos presentados por la ANEN <sup>[2]</sup> (Asociación Nacional de Empresas Náuticas) sobre las embarcaciones de recreo y su tendencia desde el 2015, cuando se empieza a recuperar el mercado naval en España des de la crisis económica que estalló en 2008.

Analizando los datos presentados por la ANEN, se observa un crecimiento notable en la matriculación de embarcaciones de recreo propulsadas a motor y con esloras comprendidas entre 12 y 16 metros como se puede deducir de las Tablas 1 y 2.

AÑOS	VELA	MOTOR
2015	2.4%	12.6%
2016	-3.3%	5.8%
2017	4.6%	11.9%
$\Sigma$	<b>3.7%</b>	<b>30.3%</b>

Tabla 1. Embarcaciones de recreo vela contra motor. Elaboración propia.

AÑOS	<8 m	8-12 m	12-16 m	>16 m
2015	8%	6.9%	24.2%	14%
2016	4.8%	-3.9%	8.1%	-2.2%
2017	7.4%	25.8%	36.7%	52.3%
$\Sigma$	<b>20.2%</b>	<b>28.8%</b>	<b>69%</b>	<b>64.1%</b>

Tabla 2. Esloras de las embarcaciones de recreo. Elaboración propia.

## CAPÍTULO 3. ANTEPROYECTO

Para la realización del proyecto, el primer paso es el análisis y confección de una base de datos con los parámetros de diseño de embarcaciones ya existentes en el mercado y de características similares a las de la embarcación que se pretende diseñar.

La base de datos estará confeccionada con las características de diseño, velocidad y de potencia de embarcaciones tipo *Hard Top* existentes actualmente en el mercado. De esta manera, se determinarán las características iniciales de la embarcación que se pretende proyectar.

### 3.1. Datos principales

Partiendo de la normativa internacional UNE-EN ISO 8666 que establece las definiciones concernientes a las dimensiones principales y los datos relacionados de las embarcaciones cuya eslora del casco sea igual o inferior a 24 metros, se procederá a la distinción de las diferentes dimensiones principales de una embarcación que podrán afectar a la base de datos y al posterior diseño.

#### 3.1.1. Mediciones longitudinales

Son las llamadas esloras de una embarcación y se deben medir paralelamente a la línea de flotación de referencia y al eje de la embarcación. Se ven representadas en la Ilustración 1.

##### Eslora total o “Lenght Over All”

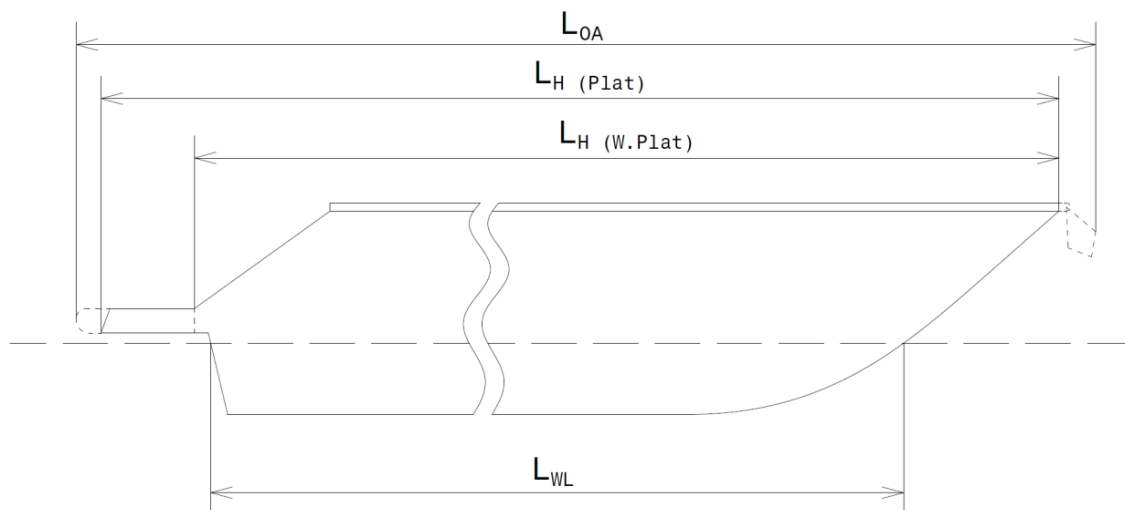
La eslora total o Lenght Over All (LoA), en inglés, es la longitud máxima de la embarcación. Incluye todas las partes estructurales de la embarcación y las que forman parte integrante de la misma. También incluye todas las partes fijas en el casco, como palos fijos, penoles, plataformas salientes en cualquier extremo de la embarcación, guarniciones de proa, timones, anclas salientes, todo sistema de propulsión que sobresalga de la popa, protecciones y defensas permanentes. Excluye los motores fuera borda y cualquier otro equipo que se pueda desmontar sin la ayuda de herramientas.

##### Eslora del casco o “Hull Lenght”

La eslora del casco o *Hull Lenght* ( $L_H$ ), en inglés, es la longitud máxima del casco. Se incluyen todas las partes estructurales de la embarcación y las que forman parte integrante de la misma, pero se excluyen todas las partes móviles que se pueden desmontar de forma no destructiva sin afectar a la integridad estructural de la embarcación.

### Eslora de flotación o “Length of Water Line”

La eslora de flotación o *Length of Water Line* ( $L_{WL}$ ), en inglés, se mide desde la parte más a proa de la intersección de la roda con el plano de flotación hasta la parte más a popa de la intersección del casco con el plano de flotación. Dicha eslora de flotación, nos define la longitud de la línea de flotación de una embarcación para un determinado estado de carga.



**Ilustración 1. Dimensiones longitudinales del casco.** Fuente: UNE-EN ISO 8666 Pequeñas Embarcaciones. Datos principales.

### 3.1.2. Mediciones transversales

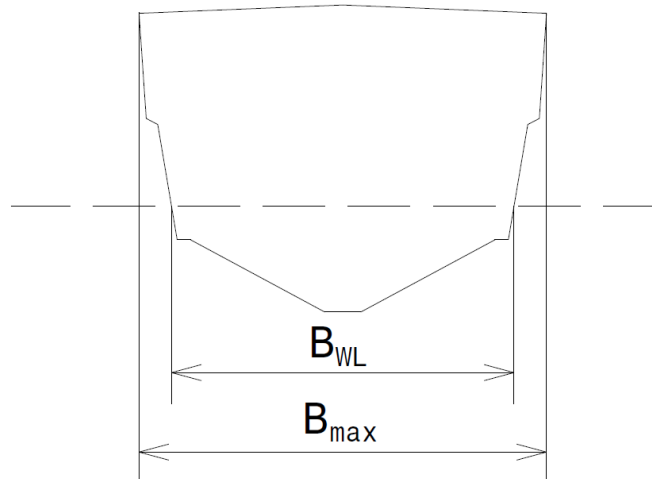
Son las llamadas mangas de una embarcación. Éstas deben ser medidas como la distancia entre dos planos paralelos al plano central de la embarcación. Se ven representadas en la Ilustración 2.

#### Manga máxima o “Beam”

La manga máxima o *Beam* ( $B_{MAX}$ ), en inglés, incluye todas las partes estructurales que forman parte integrante de la embarcación. Se define como la longitud comprendida entre dos planos tangentes a las partes más exteriores de la embarcación.

#### Manga de flotación o “Beam of Water Line”

La manga de flotación o *Beam of Water Line* ( $B_{WL}$ ), en inglés, se define como la máxima distancia entre la intersección de la superficie del casco con el plano de flotación para una condición de carga determinada.



**Ilustración 2. Dimensiones transversales del casco.** Fuente: UNE-EN ISO 8666 Pequeñas Embarcaciones. Datos principales.

### 3.1.3. Mediciones verticales

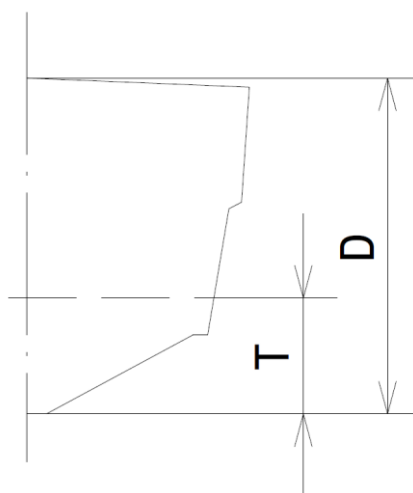
Éstas deben ser medidas como la distancia en altura de una embarcación. Se distinguen dos medidas principales, el calado y el puntal. Se ven representados en la Ilustración 3.

#### Puntal o “Draft”

El puntal o *Draft* ( $D$ ), en inglés, se define como la distancia vertical entre la línea de flotación y el punto más bajo del casco, incluyendo la quilla.

#### Calado o “Depth”

El calado o *Depth* ( $T$ ), en inglés, se define como la distancia vertical entre la línea de flotación y el punto más bajo de la obra viva o apéndices, incluyendo las orzas. Dicha medición es variable, dependiendo del estado de carga de la embarcación.



**Ilustración 3. Dimensiones verticales del casco.** Fuente: UNE-EN ISO 8666 Pequeñas Embarcaciones. Datos principales.

### 3.2. Base de Datos

Para el dimensionamiento básico y posterior diseño del casco de la embarcación, se ha confeccionado y analizado una base de datos. Esta base de datos, se ha confeccionado a partir de embarcaciones ya existentes en el mercado con características similares a las que se pretende proyectar. Una vez confeccionada la base de datos, se extraerá la información necesaria para el diseño de nuestra embarcación mediante un estudio de regresiones lineales.

Se analizan los datos de más de 50 embarcaciones tipo Hard Top existentes en el mercado con una eslora comprendida entre los 12 y 16 metros. Partiendo de esta base de datos y el análisis de regresiones lineales, se han ido descartando embarcaciones para obtener un estudio de regresiones lineales favorable para la determinación de las dimensiones principales de la embarcación a proyectar. Considerando una regresión lineal buena, cuyo valor de coeficiente de correlación  $R^2$  sea superior de 0,7.

La base de datos definitiva se confecciona de 12 embarcaciones existentes en el mercado, cuyos datos principales se han obtenido de la página web de la marca de cada embarcación analizada.

NAME
RIO 42 Air
Sea Ray Sport Boat 400 SLX
Sea Ray Sport Boat 400 SLX-OB
Sea Ray Sundancer 460
Sessa Yacht C42
Fairline Targa 48 Open
Fairline Targa 43 Open
Cranchi M44 HT
Cranchi E52 S Evoluzione
Princess V40
Sunseeker Portofino 40
Azimut Atlantis 43

**Tabla 3. Base de datos. Embarcaciones que la confeccionan.** Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros más significativos a tener en cuenta son:

- Eslora
- Manga
- Calado

- Puntal
- Desplazamiento
- Velocidad
- Capacidad del tanque de combustible
- Capacidad del tanque de agua dulce
- Potencia necesaria

### 3.3. Dimensionamiento básico

A través del análisis de la base de datos mediante el método de regresiones lineales, se estudia el coeficiente de correlación  $R^2$ , cuyo valor debe ser próximo a 1 pero se considera un valor favorable un valor superior al 0,7.

El coeficiente de correlación  $R^2$  indica el grado de relación que hay entre las variables analizadas en una base de datos.

Se realizan gráficas relacionando los diferentes parámetros que se han considerado necesarios para la obtención de los datos principales de la embarcación a proyectar. De estas gráficas se hallaran las ecuaciones de las rectas del estudio de regresiones lineales, las cuales nos van a permitir hallar un valor estimado del cual partir para empezar el diseño. Además, como ya se ha comentado anteriormente, a través del coeficiente de correlación  $R^2$  podemos analizar si los valores iniciales hallados son idóneos para el diseño o se tendrá que optimizar el casco en una segunda vuelta en el diseño.

Se tendrá en cuenta que la mayoría de las relaciones que se analizarán, serán regresiones en función de la eslora debido a que es el parámetro significativo que se ha definido en el proyecto.

#### 3.3.1. Estudio de Regresiones Lineales

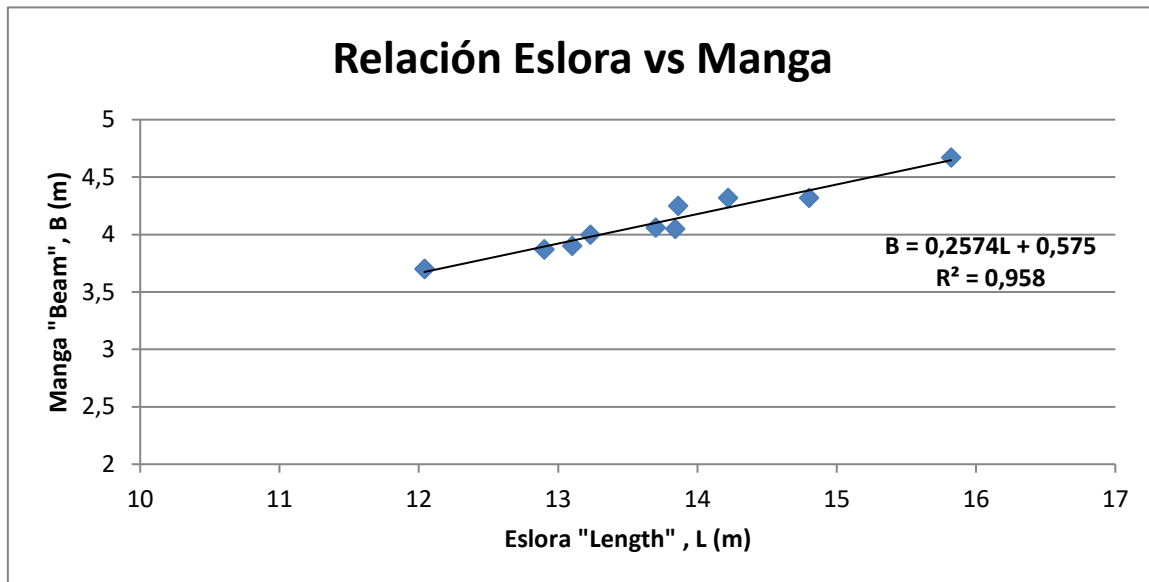
Estas son las regresiones lineales que se analizarán:

- $B_{MAX} = f(LOA)$
- $T_{MAX} = f(LOA)$
- $T_{MAX} = f(B_{MAX})$
- $\Delta = f(LOA)$
- $V_{MAX} = f(LOA)$
- $P_{MAX} = f(LOA)$
- $T_{COMB} = f(LOA)$
- $T_{AD} = f(LOA)$

Sería interesante hacer otra regresión lineal y su posterior análisis del puntal en función de la eslora  $D_{MAX} = f(LOA)$  y el puntal en función de la manga  $D_{MAX} = f(B_{MAX})$  pero, los diseñadores de

este tipo de embarcaciones y con este rango de esloras, difícilmente dan el puntal de la embarcación y se han descartado las regresiones.

### Eslora Total vs Manga Máxima



Il·lustració 4. Relació  $B_{MAX} = f(L_{OA})$ . Fuente: Elaboración propia.

Se considera una regresión muy favorable debido a que el valor de la correlación lineal  $R^2$  es superior al 0,7 y muy próximo al 1, es decir, el valor hallado de la manga será un valor muy próximo al óptimo en el diseño de la embarcación. Teniendo la eslora y la manga como valores muy próximos al óptimo de la embarcación, se considera que la base de datos es buena independientemente del resto de regresiones. De esta forma, sabremos cuales son los valores que se deberían optimizar en una segunda vuelta de la conocida espiral de diseño para optimizar el diseño.

Partiendo de una eslora de 13,5 metros y de la ecuación encontrada de la regresión lineal, se encuentra el valor de la manga:

$$B = 0,2574L + 0,575 \longrightarrow B = 4,05m$$

## Eslora Total vs Calado Máximo

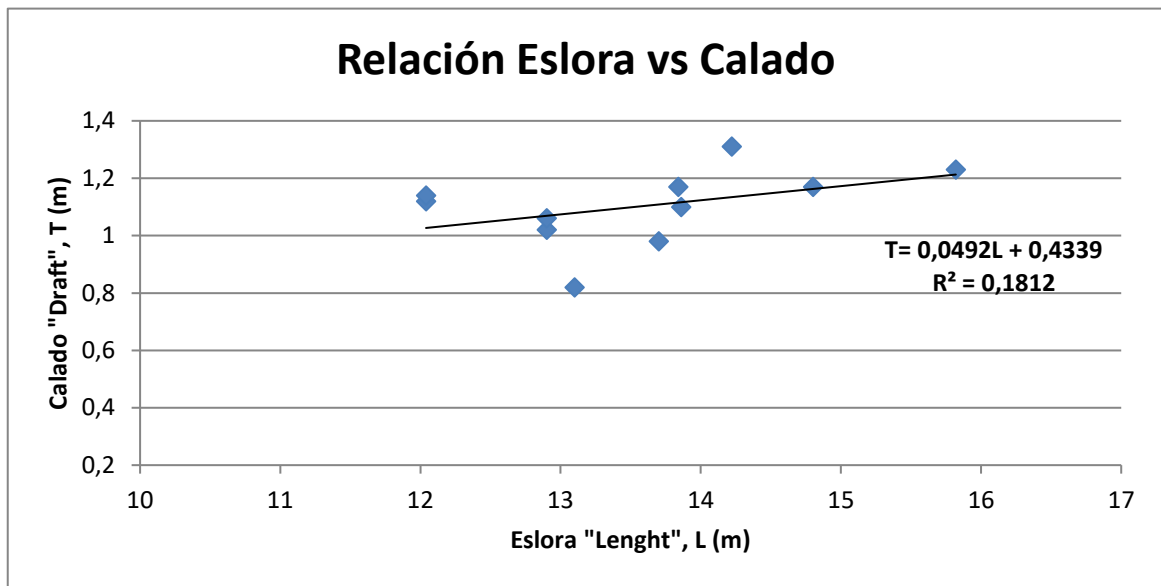


Ilustración 5. Relación  $T_{MAX} = f(LOA)$ . Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el valor del coeficiente de correlación no es el adecuado para considerar que el calado hallado de las ecuaciones de la regresión lineal sea el idóneo para el diseño de la embarcación.

Considerando que la manga encontrada estará muy cerca de un valor óptimo respecto a la eslora que pretendemos proyectar, se hace el estudio de otra regresión lineal para hallar el calado, relacionando el calado en función de la manga.

$$T = 0,0492L + 0,4339 \longrightarrow T = 1,09m$$



Manga máxima vs Calado Máximo

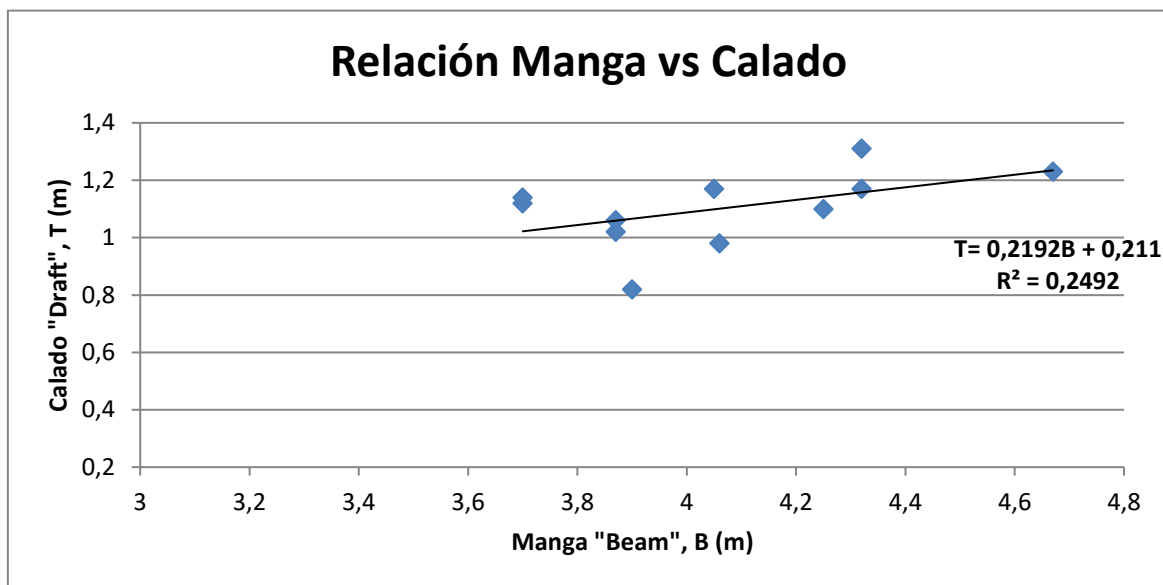


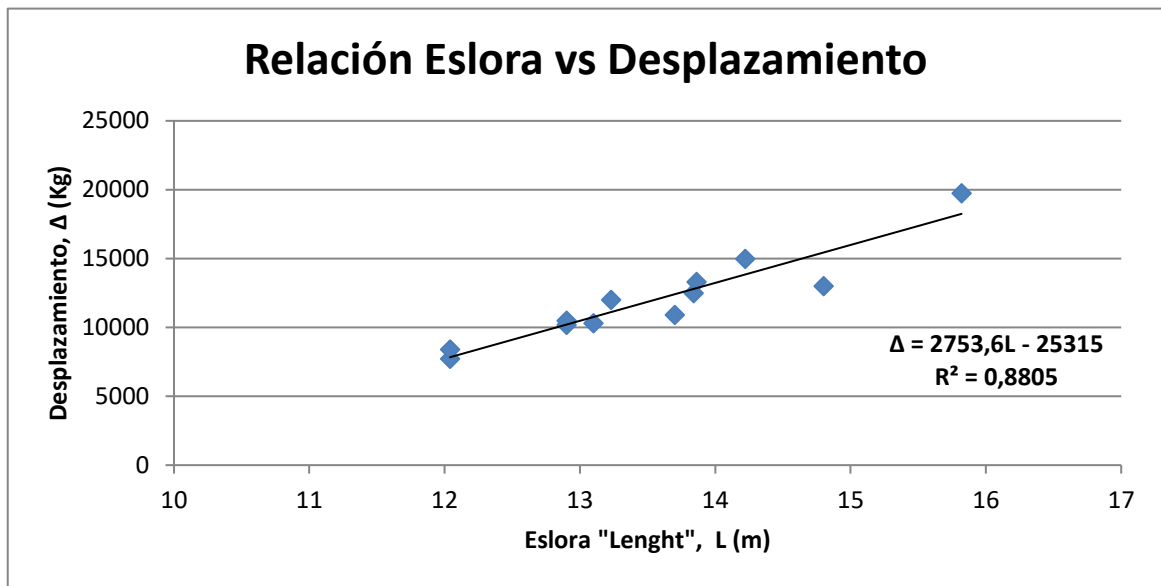
Ilustración 6. Ilustración 5. Relación  $T_{MAX} = f(B_{MAX})$ . Fuente: Elaboración Propia.

Observamos una regresión lineal mejor que la anterior, aunque aún está lejos de un valor de coeficiente de correlación óptimo. Aún así, utilizaremos la ecuación de la regresión lineal para hallar el calado del cuál partir el diseño, debido a que el coeficiente de correlación mejora de la anterior relación eslora vs calado.

Partiendo de la manga que se ha hallado en la primera relación lineal, 4,05 metros, y de la ecuación encontrada a través de la relación  $T_{MAX} = f(B_{MAX})$ :

$$T = 0,2192B + 0,211 \longrightarrow T = 1,10m$$

## Eslora Total vs Desplazamiento



Il·lustració 7. Relació  $\Delta = f(\text{LOA})$ . Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el coeficiente de correlación  $R^2$  es superior al 0,7, es decir, se considerará el valor del desplazamiento hallado como un valor próximo al esperado en cuanto se optimice el casco de la embarcación.

Partiendo de la consideración inicial de la eslora de 13,5 metros y de la formula de la gráfica de la relación lineal, hallamos:

$$\Delta = 2753,6L - 25315 \longrightarrow \Delta = 11859 \text{ Kg}$$

Eslora Total vs Velocidad Máxima

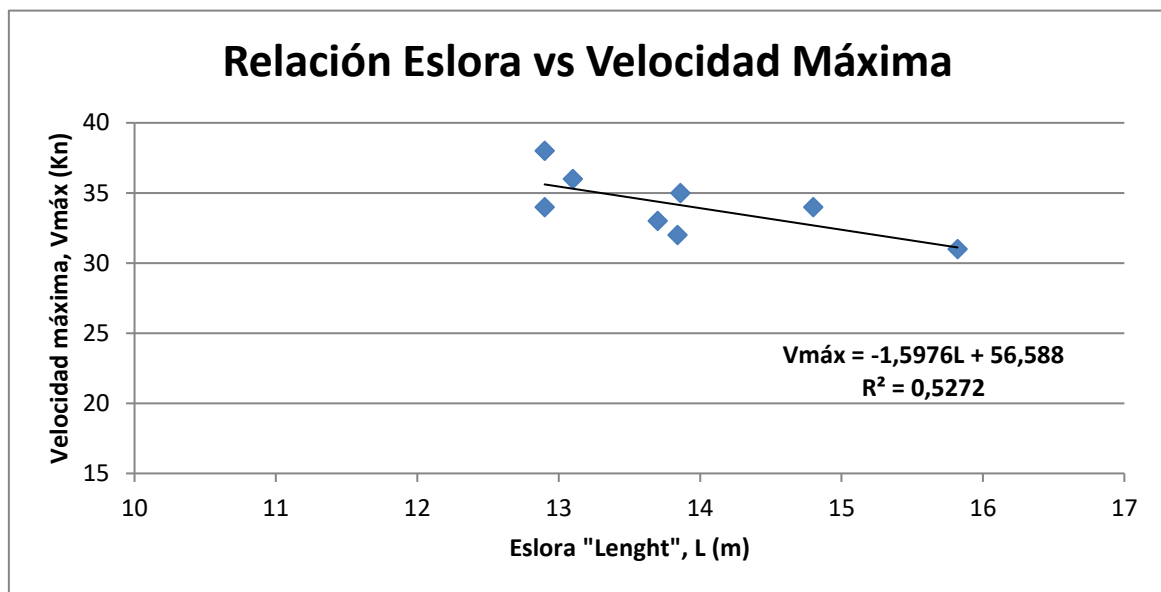


Ilustración 8. Relación VMAX = f(LOA). Fuente: Elaboración propia.

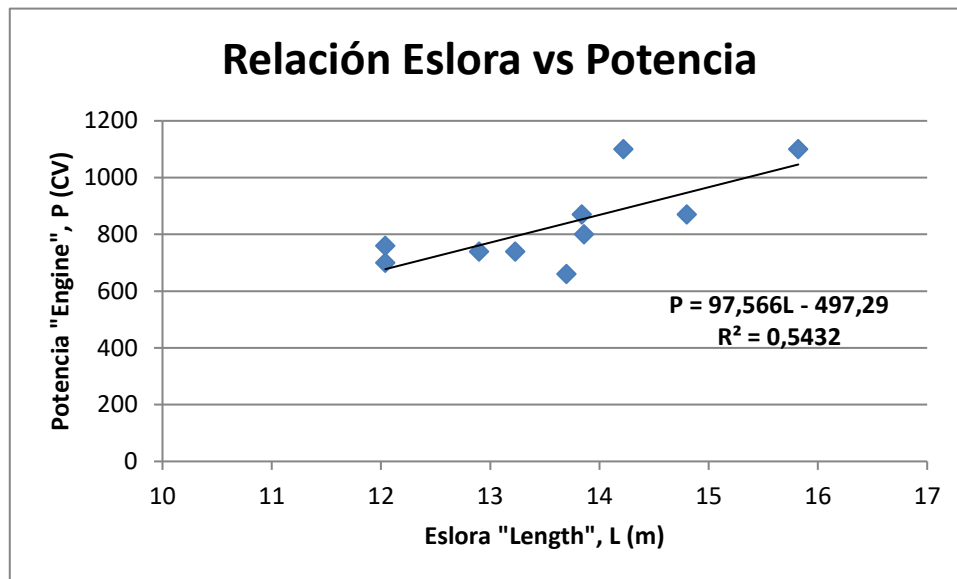
No todos los diseñadores dan los datos de velocidad de sus embarcaciones, lo que hace que la relación lineal no sea del todo favorable ya que faltan datos de algunas de las embarcaciones que se han estudiado en la base de datos.

A pesar de ello, se considera que la relación lineal no es del todo desfavorable debido a que el valor de la relación de correlación es un valor próximo al 0,7, valor que se toma como mínimo para considerar favorable la regresión. Aún así, sabemos que el valor de la velocidad máxima que se hallará será un valor cercano al óptimo pero que se deberá optimizar.

Partiendo de la eslora de 13,5 metros y la ecuación de la regresión lineal, se halla el valor de la velocidad máxima de la embarcación a proyectar:

$$V_{MÁX} = -1,5976L + 56,588 \longrightarrow V_{MÁX} = 35 \text{ Kn}$$

## Eslora Total vs Potencia Máxima

Il·lustració 9. Relación  $P = f(LOA)$ . Fuente: Elaboración propia.

Esta relación, nos da una orientación de la potencia máxima necesaria que necesitará la embarcación para poder navegar a una velocidad aproximada a la encontrada anteriormente. Aunque solo nos servirá como orientación, debido a que en el apartado de geometría del casco se estudiará la potencia que requiere la embarcación para navegar a una velocidad determinada mediante métodos de predicción estadística.

Partiendo del criterio inicial de tener una eslora de 13,5 metros y de la ecuación del análisis de regresión lineal, se halla:

$$P_{\text{MÁX}} = 97,566L - 497,29 \longrightarrow P_{\text{MÁX}} = 820 \text{ CV}$$

Eslora Total vs Tanque de Combustible

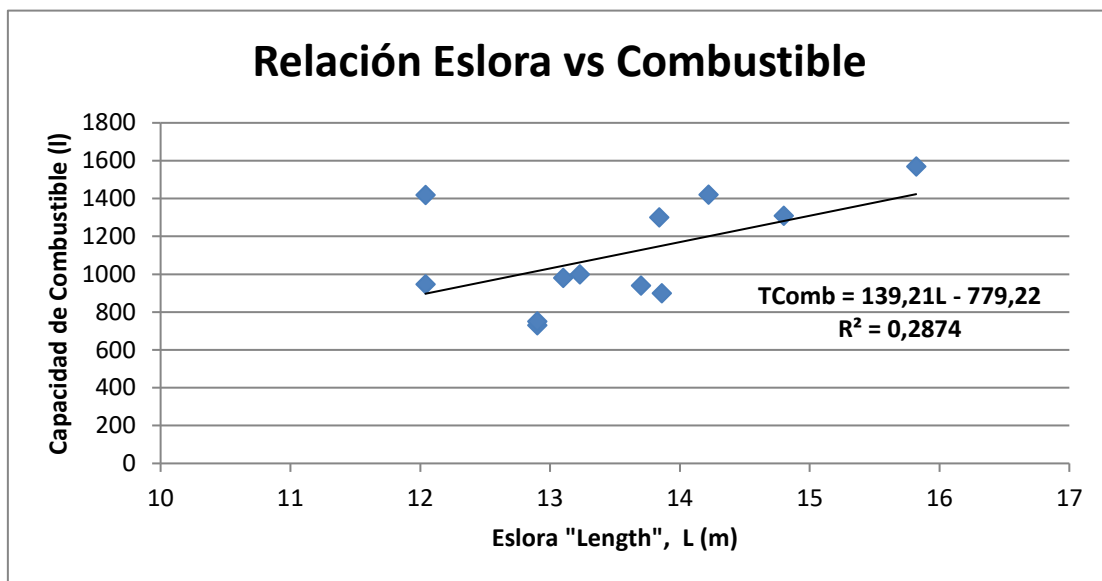


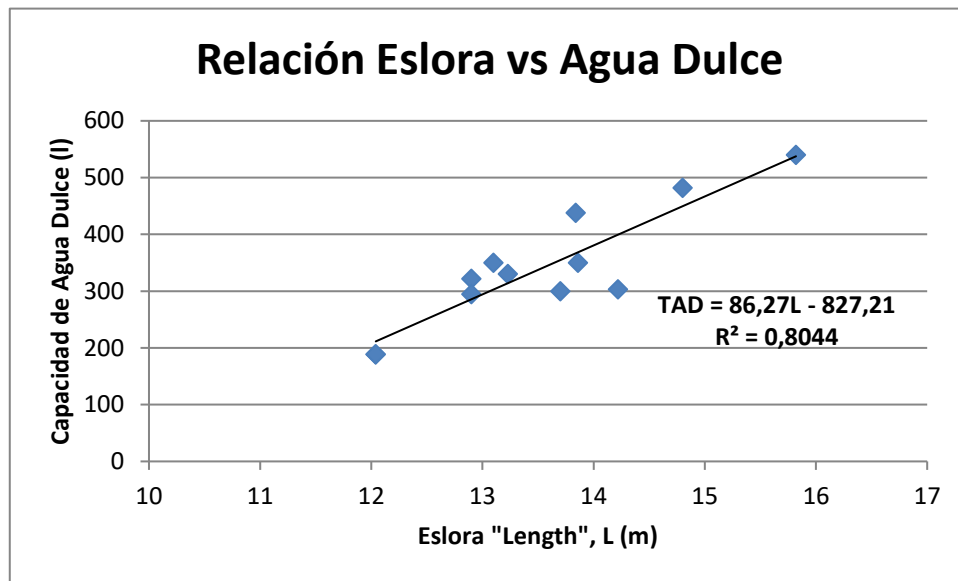
Ilustración 10. Relación Tcomb = f(LOA). Fuente: Elaboración propia.

La relación  $T_{COMB} = f(LOA)$  permite hallar la capacidad del tanque de combustible que deberá tener la embarcación proyectada. Se hace el mismo análisis que el resto de relaciones, destacando que el valor de correlación lineal es del 0,28, muy lejos del mínimo de 0,7, lo que implica que el valor hallado no será un valor óptimo. Aún así, es un valor interesante a analizar y comparar con otras embarcaciones porque será un valor determinante en el apartado de propulsión.

Partiendo de la eslora de 13,5 metros y de la ecuación de regresión lineal, se halla el valor de la capacidad del tanque de combustible:

$$T_{COMB} = 139,21L - 779,22 \longrightarrow T_{COMB} = 1100L$$

## Eslora Total vs Tanque de Agua Dulce

Ilustración 11. Relación  $TAD = f(LOA)$ . Fuente: Elaboración propia.

Igual que el valor de la capacidad del tanque de combustible, el valor de la capacidad del tanque de agua dulce es determinante en el diseño de una embarcación.

En este proyecto no se va a utilizar demasiado, debido a que solo se centra en el sistema propulsivo y no en el resto de los sistemas de la embarcación.

Se halla el valor de la capacidad del tanque de agua dulce a través de la ecuación de regresión lineal, partiendo de una eslora de 13,5 metros:

$$TAD = 86,27L - 827,21 \longrightarrow TAD = 337L$$

Recopilación de las determinaciones principales de la embarcación a proyectar:

RESULTADOS OBTENIDOS		
PARÁMETROS	VALOR	UNIDADES
Longitud	13,5	m
Manga	4,05	m
Calado	1,10	m
Desplazamiento	11859	Kg
Velocidad	35	Kn
Potencia	820	CV
Capacidad Combustible	1100	L
Capacidad Agua Dulce	337	L

Tabla 4. Parámetros de diseño. Fuente: Elaboración propia.

Se analizan y comparan los parámetros obtenidos a través del estudio de regresiones lineales, buscando semejanzas entre las embarcaciones ya existentes en el mercado que se han analizado en la base de datos.

Se observa que los datos obtenidos de dimensionamiento del casco y velocidad en las regresiones lineales son parecidos a los datos proporcionados por el fabricante de la embarcación Cranchi M44 HT, por lo que se consideran valores favorables como parámetros iniciales de la primera vuelta de la conocida espiral de diseño.

PARÁMETROS	CRANCHI M44 HT	EMBARCACIÓN PROYECTO
ESLORA	13,7 m	13,5 m
MANGA	4,06 m	4,05 m
CALADO	0,98 m	1,10 m
PUNTAL	5,18 m	-
DESPLAZAMIENTO	10900 Kg	11859 Kg
POTENCIA	660 CV	820 CV
VELOCIDAD MÁXIMA	33 Kn	35 Kn
TANQUE COMBUSTIBLE	940 L	1100 L
TANQUE AGUA DULCE	300 L	337 L

Tabla 5. Comparativa de diseño. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL CASCO

A partir de la determinación de los parámetros de diseño iniciales, en este capítulo se realizará el diseño del casco de la embarcación mediante el programa informático Maxsurf.

Una vez creada la geometría del casco se hará un análisis mediante métodos de predicción estadística como Holtrop y Savitsky para determinar la potencia requerida por la embarcación.

### 4.1. Dimensionamiento del casco

Se ha realizado el diseño del casco utilizando el software de Maxsurf, partiendo de un modelo ya prediseñado por el mismo programa. Este software de diseño se utiliza en la ingeniería naval debido a que es un programa capaz de ayudar en la concepción del diseño de una embarcación, además de poder realizar estudios de dimensionamiento, estabilidad y resistencias.

Se ha elegido el programa Maxsurf para así poder realizar los estudios de predicción estadística de la resistencia al avance en contra la velocidad. De esta manera, se puede analizar la potencia necesaria requerida por la embarcación a determinada velocidad.

En el diseño de la embarcación se han buscado formas semejantes a la embarcación Cranchi M44 HT. De esta manera, se pretende conseguir que las formas de la embarcación sean semejantes a las formas que hay actualmente en el mercado, para así poder tener una buena estimación de la potencia requerida por la embarcación a determinada velocidad.

A continuación, se muestra el diseño del casco en las tres vistas dimensionales:

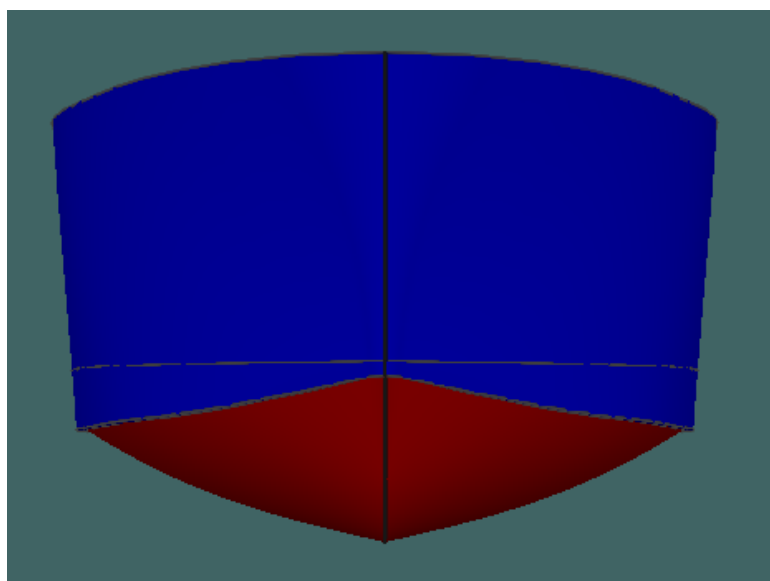


Ilustración 12. Alzado del casco. Fuente: Elaboración propia.



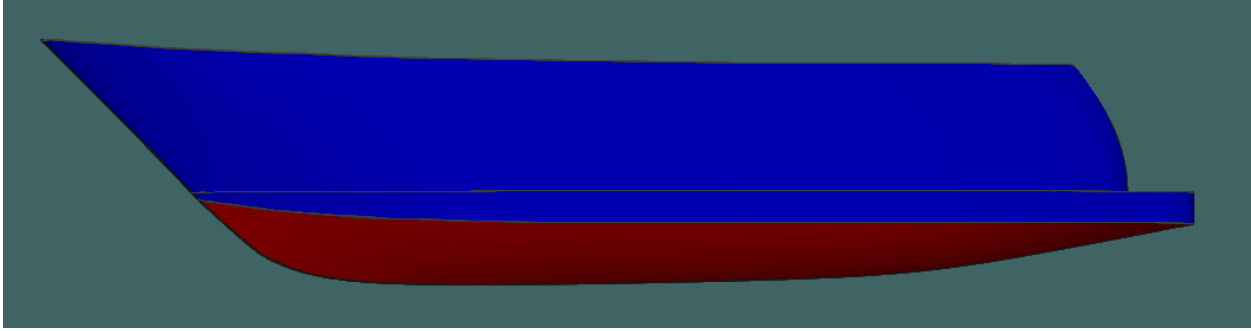


Ilustración 13. Perfil del casco. Fuente: Elaboración propia.

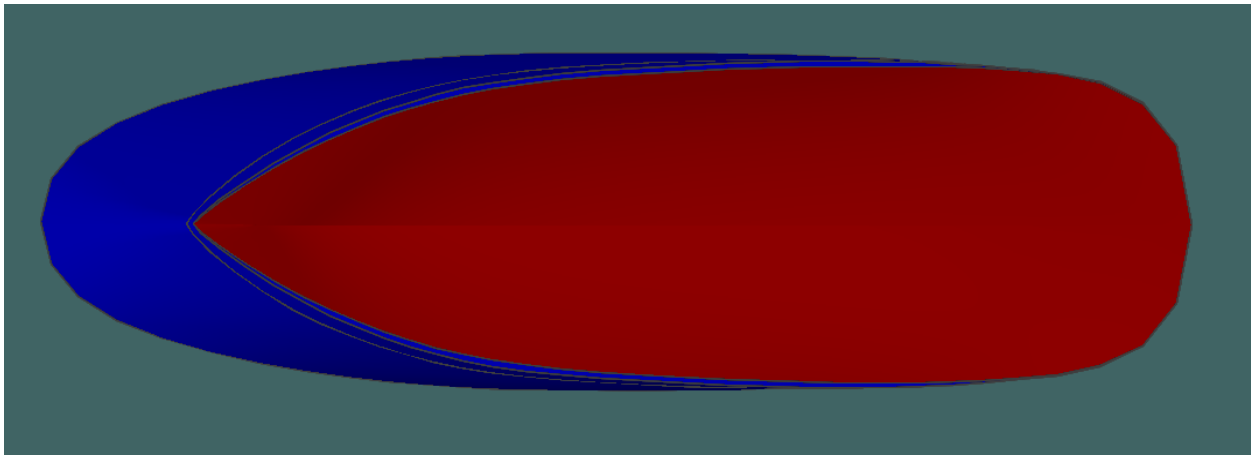


Ilustración 14. Planta del casco. Vista de la obra viva. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se presenta la comparativa entre las dimensiones principales de la embarcación calculadas a través de las regresiones lineales y las obtenidas a través del programa de diseño de Maxsurf.

PARÁMETRO	CÁLCULO REGRESIONES LINEALES	DISEÑO OBTENIDO A TRAVÉS DE MAXSURF
LOA	13,5 m	13,5 m
B <sub>Máx</sub>	4,05 m	4,05 m
T <sub>Máx</sub>	1,10 m	1,07 m
D <sub>Hull</sub>	-	2,85 m
$\Delta$ <sub>Máx</sub>	11859 Kg	25500 Kg
P	820 CV	-

$V_{Máx}$	35 Kn	-
$T_{Comb}$	1100 L	-
$T_{AD}$	337 L	-

**Tabla 6. Comparativa entre dimensiones.** Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el desplazamiento obtenido en el diseño de la embarcación, se eleva respecto al desplazamiento calculado a través de las regresiones lineales. Esto nos indica que el casco de la embarcación, en una segunda vuelta de la espiral de diseño, se debería optimizar debido a que va implicar una exageración en el cálculo de la resistencia del casco, implicando así un mayor cálculo de la potencia requerida por la embarcación. Aún así, se procederá al análisis de métodos de estimación estadísticos para el estudio y obtención de la potencia necesaria a determinada velocidad.

También se puede observar el valor del desplazamiento y los coeficientes del casco en la Tabla 7 que se presenta a continuación, en la siguiente página.

**Condiciones hidrostáticas de la embarcación**

Measurement	Value	Units
Displacement	25,5	t
Volume (displaced)	24,881	m <sup>3</sup>
Draft Amidships	1,07	m
Immersed depth	1,07	m
WL Length	10,96	m
Beam max extents on WL	3,893	m
Wetted Area	50,795	m <sup>2</sup>
Max sect. area	2,922	m <sup>2</sup>
Waterpl. Area	35,274	m <sup>2</sup>
Prismatic coeff. (Cp)	0,777	
Block coeff. (Cb)	0,545	
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,74	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,827	
LCB length	4,725	from zero pt. (+ve fwd) m
LCF length	4,948	from zero pt. (+ve fwd) m
LCB %	43,114	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
LCF %	45,143	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
KB	0,698	m
KG fluid	0	m
BMt	1,48	m
BML	11,057	m
GMt corrected	2,178	m
GML	11,754	m
KMt	2,178	m
KML	11,754	m
Immersion (TPc)	0,362	tonne/cm
MTc	0,273	tonne.m
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	0,969	tonne.m
Length:Beam ratio	2,815	
Beam:Draft ratio	3,64	
Length:Vol <sup>0.333</sup> ratio	3,754	
Precision	Medium	65 stations

**Tabla 7. Condiciones Hidrostáticas.** Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2. Estudio y análisis de la potencia requerida

En el presente apartado se realiza la primera fase relacionada con el sistema propulsivo del proyecto, donde se estudiará y analizará la potencia requerida por la embarcación mediante métodos de estimación estadísticos, utilizando el programa informático Maxsurf Resistance.

### Métodos de estimación estadísticos

Los métodos de estimación estadísticos que se estudiarán en este apartado, son los métodos de Holtrop y Savitsky, los cuales van a permitir dar una predicción de la potencia necesaria para la embarcación en función de su velocidad.

Se pondrá especial énfasis en el método de Savitsky, ya que nos define las condiciones de planeo de la embarcación teniendo en cuenta el ángulo de trimado y la velocidad de la embarcación en función de la resistencia al avance.

Dentro del método de Savitsky se tiene en cuenta dos condiciones en las que se encuentra la embarcación; cuando la embarcación está planeando y cuando empieza a planear. Dichas condiciones se analizan mediante los métodos definidos por Savitsky Planning y Savitsky Pre-Planning. El método de pre-planeo basa sus cálculos en los mismos que el método de planeo, pero teniendo en cuenta ciertas correcciones con los que se determinan unos resultados menos ideales, por los que podrían parecerse más a la realidad.

### Análisis de la potencia requerida

Viendo la semejanza entre las dimensiones de la embarcación a proyectar y la embarcación ya existente en el mercado Cranchi M44 HT en la tabla 5 del capítulo anterior, se realizará el estudio de la estimación de la potencia hasta una velocidad de 33Kn, reduciendo así la velocidad obtenida en la base de datos de 35Kn para que sea un proyecto más real.

Es importante conocer qué métodos de predicción de la potencia se deben utilizar para cada rango de velocidad. Para ello, se observa y analiza el cálculo del número de Froude para distintos rangos de velocidad.

El número de Froude (Fn) es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de la gravedad que actúan sobre un fluido. De esta forma, el número de *Froude* se puede escribir como:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Donde;

- V: Velocidad (m/s)
- g: Gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- L: Eslora de la embarcación (m)

En el caso de que:

- $F_n > 1$  el régimen del flujo será supercrítico. Condiciones de planeo.
- $F_n = 1$  el régimen del flujo será crítico. Condiciones de pre-planeo.
- $F_n < 1$  el régimen del flujo será subcrítico. La embarcación no planea.

Se analizan los valores obtenidos en el programa informático de Maxsurf Resistance y se crea la Tabla 8, donde se pueden observar distintos rangos de velocidad que da el programa frente el número de *Froude*.

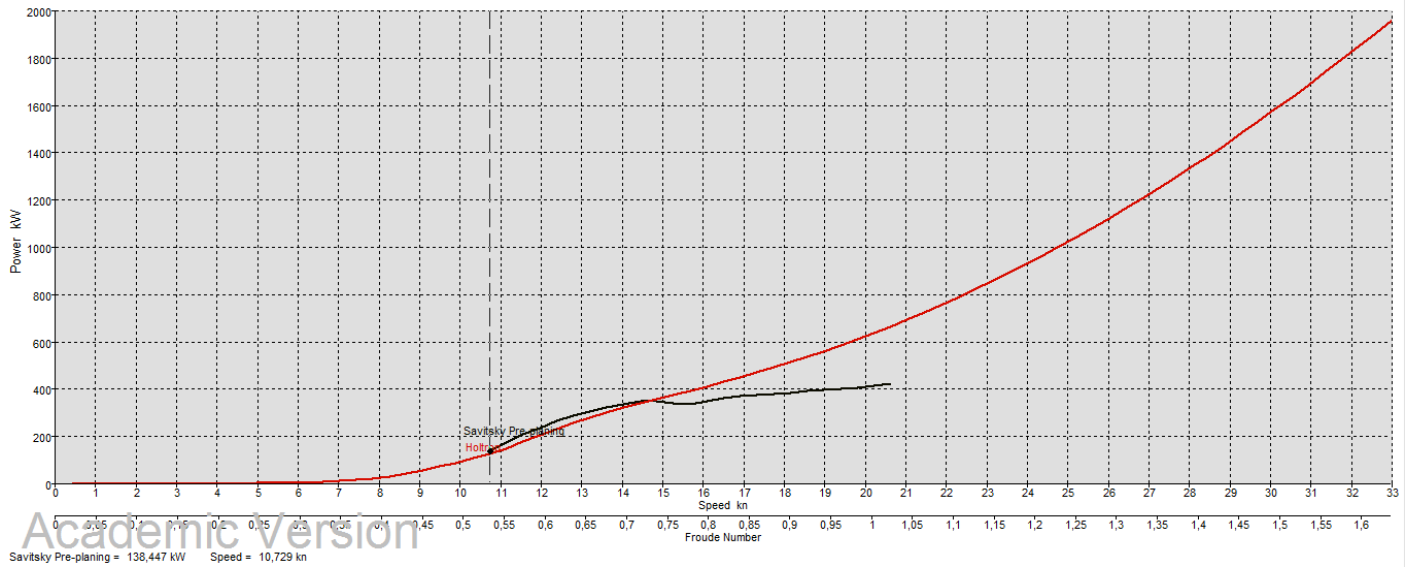
Como se observa en la Tabla 8, para velocidades bajas de entre los 0Kn y los 10Kn, aproximadamente, el número de *Froude* es de régimen subcrítico, lo que cabe esperar que la embarcación no esté planeando y se utilizará el método de predicción estadístico de Holtrop para la obtención de la potencia este rango de velocidades.

Velocidad (Kn)	Froude
4,95	0,476
9,9	0,952
10,75	1,031
12,375	1,190
15,675	1,507
20,625	1,983
33	3,172

**Tabla 8. Número de Froude frente velocidad.** Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8, también se observa que entre las velocidades de 10Kn y 12Kn, aproximadamente, los números de *Froude* están cerca del valor crítico 1, donde la embarcación se encuentra en condiciones de pre-planeo, afectando así, a la potencia requerida por la embarcación.

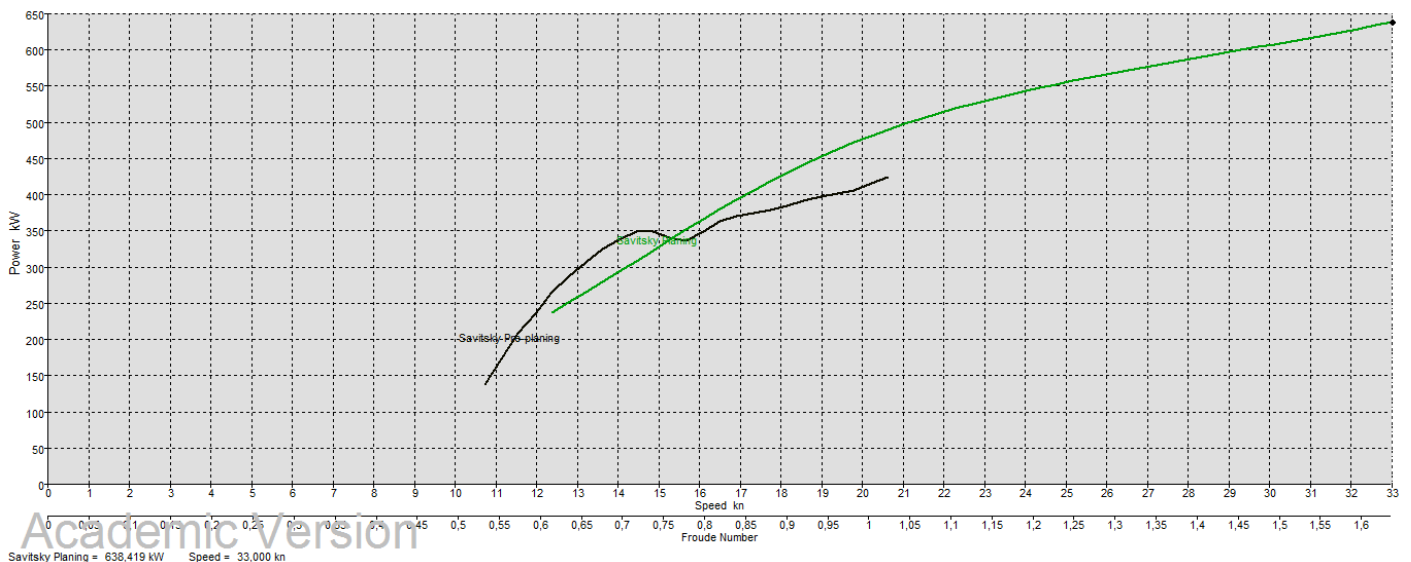
Como se observa en la Ilustración 15, el método de predicción estadístico de Holtrop se utiliza para la predicción de la potencia requerida hasta una velocidad de 10,729Kn, sin incluir a ésta en el análisis del método de Holtrop, donde la velocidad pasa a ser crítica y se analiza a través del método de pre-planeo de Savitsky, dando una potencia necesaria de 138,4 KW, haciendo factor de conversión para pasar a caballos de potencia, se obtiene una potencia necesaria de 185,6 HP.



**Ilustración 15. Método de Holtrop y Savitsky Pre-Planning.** Fuente: Elaboración Propia.

Posterior al análisis del método de Holtrop. Se analiza el método de predicción estadístico de Savitsky, donde las condiciones de la embarcación se encuentran en condición de pre-planeo y planeo.

Como se observa en la Ilustración 16, se obtiene una potencia necesaria de 638,419KW a los 33Kn que se pretende que llegue la embarcación, que si se hace el factor de conversión para la obtención de la potencia en caballos, se obtiene una potencia requerida de 856,13 HP.



**Ilustración 16. Método de Savitsky Pre-Planning y Savitsky Planning.** Fuente: Elaboración Propia.

	Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Savitsky Pre-planing Resist. (kN)	Savitsky Pre-planing Power (kW)	Savitsky Planing Resist. (kN)	Savitsky Planing Power (kW)
3	1,850	0,082	0,159	--	--	--	--
4	2,475	0,123	0,238	--	--	--	--
5	3,300	0,184	0,317	--	--	--	--
6	4,125	0,205	0,397	--	--	--	--
7	4,950	0,246	0,476	--	--	--	--
8	5,775	0,287	0,555	--	--	--	--
9	6,600	0,327	0,634	--	--	--	--
10	7,425	0,388	0,714	--	--	--	--
11	8,250	0,409	0,793	--	--	--	--
12	9,075	0,450	0,872	--	--	--	--
13	9,900	0,491	0,952	--	--	--	--
14	10,725	0,532	1,031	25,0	138,083	--	--
15	11,550	0,573	1,110	35,1	208,507	--	--
16	12,375	0,614	1,190	41,7	265,262	37,3	237,250
17	13,200	0,655	1,289	45,2	308,803	39,0	284,870
18	14,025	0,696	1,348	46,8	337,387	40,7	293,616
19	14,850	0,737	1,428	45,6	348,482	42,3	322,854
20	15,675	0,778	1,507	41,6	335,706	43,6	351,834
21	16,500	0,819	1,588	42,8	363,353	44,7	379,802
22	17,325	0,880	1,688	42,0	374,788	45,6	408,127
23	18,150	0,901	1,745	41,3	385,306	46,1	430,377
24	18,975	0,942	1,824	40,7	397,008	46,3	452,341
25	19,800	0,982	1,903	39,9	408,207	46,3	472,001
26	20,625	1,023	1,983	40,1	425,018	46,1	489,481
27	21,450	1,064	2,062	--	--	45,8	504,991
28	22,275	1,105	2,141	--	--	45,3	518,784
29	23,100	1,146	2,221	--	--	44,7	531,128
30	23,925	1,187	2,300	--	--	44,1	542,274
31	24,750	1,228	2,379	--	--	43,4	552,467
32	25,575	1,269	2,459	--	--	42,7	561,920
33	26,400	1,310	2,538	--	--	42,0	570,824
34	27,225	1,351	2,617	--	--	41,4	579,347
35	28,050	1,392	2,697	--	--	40,7	587,634
36	28,875	1,433	2,776	--	--	40,1	595,812
37	29,700	1,474	2,855	--	--	39,5	603,990
38	30,525	1,515	2,935	--	--	39,0	612,262
39	31,350	1,556	3,014	--	--	38,5	620,712
40	32,175	1,597	3,093	--	--	38,0	629,410
41	33,000	1,637	3,172	--	--	37,6	638,419

Tabla 9. Métodos de estimación de la Potencia requerida. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se presentan los dos métodos de Savitsky; Savitsky Pre-Planning y Savitsky Planning frente a la velocidad de la embarcación proyectada.

El programa de Maxsurf calcula las condiciones de pre-planeo y planeo a la vez entre las velocidades de 12,375Kn, donde la embarcación empieza a planear y 20,625Kn, donde el programa considera que la condición de pre-planeo ya no está presente. Como se ha mencionado anteriormente, el método de pre-planeo basa sus cálculos en los mismos que el método de planeo, pero teniendo en cuenta ciertas correcciones con los que se determinan unos resultados menos ideales, por los que podrían parecerse más a la realidad. Esto significa, que se debe tener en cuenta la potencia más elevada para las velocidades que coincidan las dos condiciones de planeo.

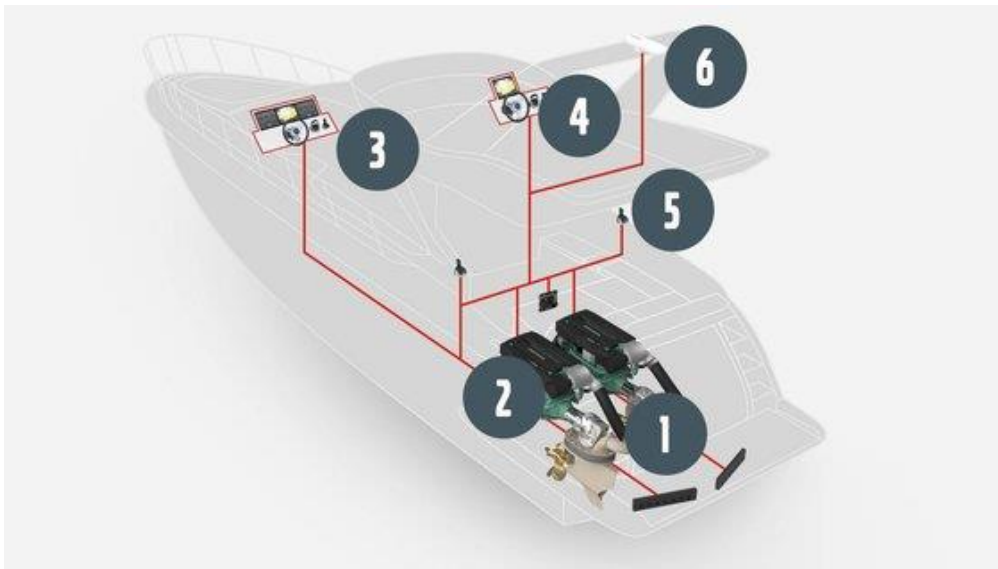
# CAPÍTULO 5. SISTEMA PROPULSIVO

## 5.1. Sistema de propulsión IPS

Una vez definida la potencia necesaria requerida por la embarcación en el capítulo anterior, se procede a la elección del motor o motores propulsivos. Antes, es importante conocer la existencia del sistema propulsivo IPS creado por la compañía Volvo Penta y sus ventajas.

### Volvo Penta IPS

Volvo Penta IPS es un sistema de propulsión completo e integrado, desde el puesto de pilotaje, pasando por el motor, hasta las hélices. A continuación, se presenta un breve esquema de la instalación IPS:



**Ilustración 17. Sistema Volvo Penta IPS.** Fuente: Página web de Volvo Penta, Sistema IPS <sup>[12]</sup>.

1. Sistemas de colas Aquamatic (dentrofueraborda) con sistema DuoProp (hélices contrarrotantes).
2. Motores propulsores conectados a las unidades propulsoras.
3. Puesto de pilotaje con acelerador, joystick, pantallas y rueda de timón.
4. Conectividad adicional en el flybridge, si tiene.
5. Joystick para atraque.
6. Otras opciones EVC disponibles, como el sistema de posicionamiento dinámico.



Volvo Penta IPS se caracteriza principalmente por su maniobrabilidad, ya que sus motores están conectados a sistemas de transmisión por pods con doble hélice contrarrotante orientadas a proa cuya unidad propulsora las dirige individualmente, permitiendo así, una elevada maniobrabilidad.

Además, los sistemas IPS son superior a los sistemas intraborda de ejes en su rendimiento, presentando un ahorro del 30% en el consumo de combustible y un 40% más de autonomía en velocidad de crucero.

En la Ilustración 18, se presenta el funcionamiento del empuje de las hélices orientadas hacia a proa. El empuje de la hélice es paralelo al casco de la embarcación, con lo que se consigue que toda su potencia impulse la embarcación hacia adelante con un elevado rendimiento, reduciendo así el consumo de combustible hasta un 30%. Esto se traduce en un aumento de la autonomía y, en su correspondencia, un descenso en las emisiones de escape.



**Ilustración 18. Hélices contrarrotantes orientadas a proa.** Fuente: Página web de Volvo Penta, Sistema IPS <sup>[12]</sup>.

Cabe destacar que los gases de escape del sistema propulsivo se emiten a través de la parte posterior de la unidad de propulsión en la estela de la hélice, por lo que quedan muy a popa de la embarcación sin perturbar la vida a bordo.

En resumen, las ventajas que presenta el sistema IPS frente a los ejes son:

- Un 40% más de autonomía de crucero
- Un 20% más de velocidad punta
- Un 30% menos de consumo de combustible
- Un 30% menos de emisiones de CO<sub>2</sub>
- Un 50 % menos de ruido percibido
- Mayor espacio a bordo

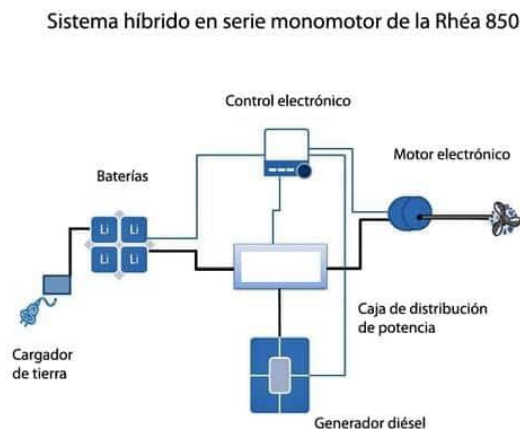
## 5.2. Análisis de las configuraciones híbridas existentes

En el mercado actual, se encuentran dos posibles configuraciones híbridas que combinan la propulsión eléctrica con la propulsión convencional de combustión; la propulsión híbrida en serie y la propulsión híbrida en paralelo.

En este apartado, se analizarán los pros y los contras de cada sistema, proporcionando un estudio completo de cada una de las opciones existentes. De esta forma, se podrá proceder a la elección del sistema híbrido que sea más viable para la embarcación proyectada.

### Sistema de propulsión híbrido en serie

La propulsión híbrida en serie es un sistema en el que el motor convencional es reemplazado por un motor totalmente eléctrico. El motor, para que pueda propulsar la embarcación debe estar conectado a un banco de baterías de alta capacidad y de recarga rápida. Además, este sistema precisa de un grupo electrógeno que actúa como corazón del sistema, ya que proporciona la energía eléctrica necesaria para; recargar rápidamente las baterías, alimentar el motor eléctrico cuando las baterías están descargadas y asegurar la alimentación de 230V de la embarcación. En resumen, el sistema de propulsión híbrido en serie precisa de un grupo electrógeno muy potente y de elevadas dimensiones, además de un elevado coste, para alimentar todas las necesidades de la embarcación.



**Ilustración 19. Elementos del sistema híbrido en serie.** Fuente: Página web de Náutica y Yates <sup>[15]</sup>.

Su funcionamiento es relativamente sencillo. Cuando se navega en modo totalmente eléctrico, el motor se alimenta de las baterías, éstas van perdiendo capacidad hasta que se encuentran en su límite de la descarga. Automáticamente, el grupo electrógeno se pone en funcionamiento y asegura, a la vez, la alimentación del motor eléctrico y la recarga de las baterías.

### Sistema de propulsión híbrido en paralelo

La propulsión híbrida en paralelo, es un sistema que consta de un motor térmico acoplado a una bobina que actúa como motor eléctrico y generador a la vez. La bobina, de tamaño reducido, se acopla tanto a la propulsión convencional de ejes, como a las propulsiones tipo saildrive de los veleros y a los sistemas IPS que presenta Volvo Penta.



**Ilustración 20. Sistema de propulsión híbrido en paralelo.** Fuente: Página web de Náutica y Yates <sup>[15]</sup>.

El funcionamiento del sistema consiste en que la bobina asume dos funciones; la producción de corriente (generador) y la motorización eléctrica (propulsor). Cuando se está navegando en modo eléctrico, la bobina actúa como propulsor de la embarcación, consumiendo la energía almacenada por el banco de baterías. Cuando se pasa a navegar en modo térmico, la bobina actúa como generador, alimentando el banco de baterías. Un sistema de gestión electrónico, informa en tiempo real de la autonomía del banco de baterías.

Para pasar del modo térmico al modo eléctrico, basta con apagar el motor y a través de un botón, pasar a alimentar la bobina con la energía almacenada en el banco de baterías. Para volver al modo térmico, es el mismo proceso, pero a la inversa. El motor térmico posee su propia batería de arranque totalmente independiente del resto. El paso de un modo al otro, se hace a través de una única caja de mando.

### 5.3. Estudio y clasificación de los motores eléctricos

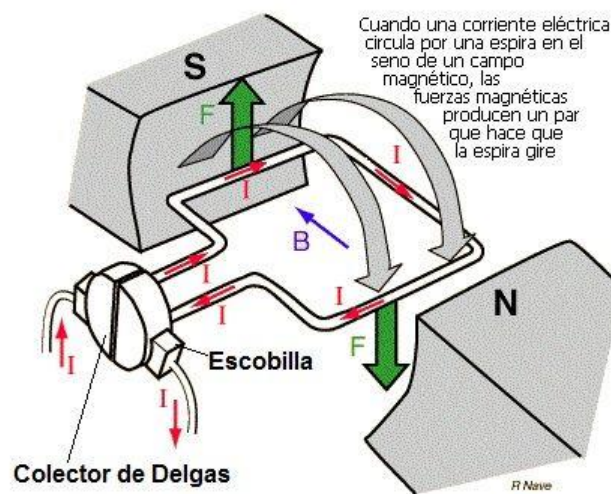
En este apartado se presenta una clasificación de los posibles motores eléctricos que se podrían utilizar en la propulsión híbrida de la embarcación a proyectar. Con el fin de realizar un estudio del funcionamiento de dichos motores y analizar sus ventajas y desventajas para su posterior elección del sistema propulsivo.

#### Funcionamiento de un motor eléctrico

El funcionamiento de un motor eléctrico se basa en la repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán fijo cuando, de acuerdo con la Ley de Lorentz, interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje, conocido como el rotor del motor. El eje permite girar libremente al electroimán entre los polos magnéticos del imán permanente situado dentro del cuerpo del motor. Este conjunto cuerpo-imán fijo, es conocido como el estátor del motor.

El imán permanente del estátor, produce un campo magnético que interactúa con el campo electromagnético que se produce cuando circula una corriente eléctrica por el bobinado del rotor. Si los polos del imán del estátor y los polos del imán del rotor coinciden, se produce un rechazo, produciendo así, un par de fuerza que provoca que el rotor rompa la inercia y comience a girar sobre su eje en el mismo sentido de las manecillas del reloj en unos casos, o en sentido contrario, de acuerdo con la forma que se encuentre conectada al circuito la pila o la batería.

En otras palabras, cuando un conductor de está inmerso en un campo magnético  $B$  y se hace circular por él una corriente eléctrica  $I$ , aparecen unas fuerzas de carácter electromagnético  $F$  que tienden a desplazarlo. El par de fuerzas generado hará girar la espira que, al disponer de un colector de delgas, hará que la corriente circule siempre en el mismo sentido manteniendo el sentido del par y por tanto del giro.



**Ilustración 21. Funcionamiento de un motor eléctrico.** Fuente: Conceptos Básicos de Máquinas de corriente continua. Mariano Alfonso Pernia (Octubre, 2011) <sup>[16]</sup>.

### Motores de corriente continua

El motor de corriente continua, denominado también motor de corriente directa, basa su funcionamiento en la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica mediante la acción de un campo magnético fijo.

El motor se compone principalmente de tres partes; el estátor, el rotor y el colector de delgas.

El estátor es la parte inductora, la que produce el campo magnético. Puede ser de devanado de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro, o de imanes permanentes. Las bobinas de hilo de cobre reciben una alimentación de corriente directa que, a causa de la circulación de la corriente continua por los devanados de excitación, se genera un campo magnético fijo.

El rotor está construido por chapas superpuestas y magnéticas, de forma cilíndrica. Dichas chapas, tienen unas ranuras donde se alojan los bobinados. El rotor recibe una alimentación externa de corriente continua por medio de un colector de delgas. El colector de delgas está fabricado con dos contactos aislados eléctricamente y cada contacto está constituido por dos escobillas deslizantes que hacen pasar la corriente continua por el bobinado del rotor. Entonces, cuando un conductor, por el que pasa una corriente eléctrica, se encuentra inmerso en un campo magnético, éste experimenta una fuerza perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente. La espira experimenta fuerzas en sus dos segmentos laterales, sin embargo, en el resto de los segmentos que interactúan con el campo magnético, las fuerzas experimentadas se cancelan entre sí. Como se observa en la Ilustración 21, las fuerzas producidas en los segmentos dan lugar a un par giratorio en el rotor. La espira experimenta fuerzas en sus dos segmentos laterales, como puede observarse en la animación de la derecha. Sin embargo, en el resto de los segmentos que interactúan con el campo magnético, las fuerzas experimentadas se cancelan entre sí.

El motor de corriente continua presenta varios inconvenientes para la propulsión híbrida que se precisa para la embarcación proyectada:

- En comparativa con los motores de corriente alterna para una misma potencia, los motores de corriente continua son de grandes dimensiones. Por lo que hace que, en una sala de máquinas, donde el dimensionamiento es muy crítico, no sea una opción viable para la propulsión híbrida.
- Su mantenimiento es muy laborioso y costos, debido principalmente al desgaste que sufren las escobillas al entrar en contacto con las del gas.

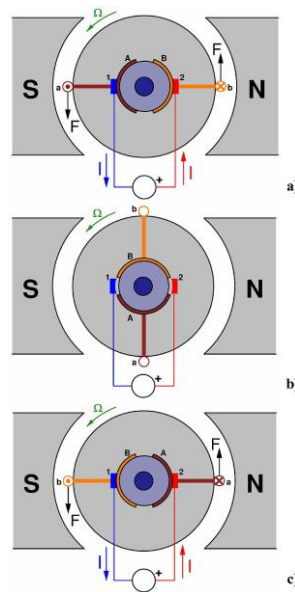


Ilustración 22. Funcionamiento Motor de Corriente Continua. Fuente: Página web Wikipedia <sup>[17]</sup>.

### Motores síncronos

La máquina síncrona, es una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de rotación del eje y la frecuencia eléctrica están sincronizadas y son mutuamente dependientes.

La máquina síncrona puede actuar tanto de motor como de generador de electricidad. Como motor síncrono, igual que cualquier otro motor eléctrico, su funcionamiento se basa en convertir la energía eléctrica en energía mecánica, dependiendo la velocidad de rotación del eje de la frecuencia de la red eléctrica a la que se encuentra conectada y del número de pares de polos del motor. Como generador síncrono, convierte la energía mecánica en energía eléctrica, donde la frecuencia entregada en las terminales dependerá de la velocidad de rotación y del número de pares de polos de la máquina síncrona.

El motor síncrono también se compone de un estátor y de un rotor:

El estator, contiene un devanado trifásico, de corriente alterna, denominado devanado inducido y un circuito magnético formado por apilamiento de chapas magnéticas. El rotor, contiene un devanado, de corriente continua, denominado devanado de campo y un devanado en cortocircuito, que impide el funcionamiento de la máquina a una velocidad distinta a la de sincronismo, denominado devanado amortiguador. Además, contiene un circuito magnético formado por apilamiento de chapas magnéticas de menor espesor que las del estátor.

Según su velocidad de giro, existen tres configuraciones posibles de rotor:

- Rotor cilíndrico; diseñado para aplicaciones que requieran elevadas velocidades de rotación.
- Rotor de polos salientes; diseñado para aplicaciones que requieran bajas velocidades.
- Rotor de imanes permanentes; diseñados para aplicaciones que requieran elevadas potencias.

### **Ventajas del motor síncrono de imanes permanentes**

A continuación, se analizarán las ventajas del motor síncrono de imanes permanentes, ya que la embarcación proyectada requiere elevadas potencias para su propulsión. Además, es el motor más utilizado en la industria naval.

Sus ventajas son:

- Sus costes de mantenimiento son relativamente bajos.
- Elevado rendimiento a plena carga.
- Permiten sobrepasar el punto nominal de trabajo, una vez sobrepasa la frecuencia nominal se llega a una zona en el cual el par disminuye y tanto la tensión como la potencia mecánica generada son constantes.
- Permiten un control concreto y directo. Si se varía la frecuencia de alimentación, se consigue variar la velocidad de giro del campo magnético generado por el estátor, consecuentemente, la velocidad del rotor varia manteniendo un par constante.



**Ilustración 23. Motor síncrono de imán permanente.** Fuente: Página web de monografías <sup>[18]</sup>.

## Motores asíncronos

El motor asíncrono, o motor de inducción es un motor eléctrico de corriente alterna en el cual su rotor gira a una velocidad diferente a la del campo magnético creado por el estátor.

A igual que el motor síncrono, el motor de inducción está formado por un rotor; que puede ser de dos tipos, de jaula de ardilla o de bobinado, y del estátor, donde se encuentran las bobinas inductoras desfasadas  $120^\circ$  en el espacio. Por estas bobinas circula un sistema de corrientes trifásicas equilibradas, cuyo desfase en el tiempo también es de  $120^\circ$ , induciendo así un campo magnético giratorio que envuelve el rotor. Por eso, la denominación de motores inducidos.

La diferencia entre el motor de inducción y el motor eléctrico síncrono recae en que el rotor no está conectado al circuito de excitación del motor, sino que está eléctricamente aislado. Tiene barras de conducción en todo su largo, incrustadas en ranuras a distancias uniformes alrededor de la periferia. Éstas, están conectadas con anillos en cortocircuito a cada extremidad del rotor.

Al estar el rotor aislado eléctricamente y con barras de conducción a lo largo de su cuerpo, se produce el efecto de Laplace; todo conductor, por el que circula una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento. Simultáneamente, se produce el efecto de Faraday; en todo conductor que se mueva en el seno de un campo magnético se induce una tensión.

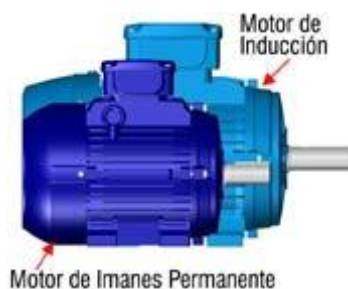
En resumen, la principal diferencia entre un motor síncrono y un motor asíncrono, es que el rotor del motor síncrono está alimentado con una corriente eléctrica directa mientras que, en el rotor de un motor asíncrono, las corrientes que circulan por el rotor se generan mediante el fenómeno de la inducción, sin partir de una conexión eléctrica.

## Motor síncrono de imanes permanentes frente al motor asíncrono

Los motores síncronos de imanes permanentes ofrecen una mejora considerable del rendimiento con respecto a los motores de inducción, incluso en condiciones de carga parcial, con un rendimiento extremadamente alto a plena carga.

Además, tienen una densidad de potencia considerablemente mayor, por lo cual, ofrece rendimientos más elevados con volúmenes de instalación mínimos y pesos reducidos. Los accionamientos de los motores de imanes permanentes, producen pares más elevados para un determinado volumen de instalación en comparación con los motores de inducción convencionales, un factor que permite ahorrar costes gracias a la opción de poder seleccionar motores de tamaños menores en ciertas aplicaciones. Factor crucial para el dimensionamiento de una sala de máquinas.





**Ilustración 24. Motor de Imanes Permanentes frente a un Motor de Inducción.** Fuente: Revista Electro Industria [19].

### 5.4. Elección del sistema propulsivo

En este proyecto se estudia la viabilidad de sustituir el sistema de propulsión convencional por un sistema híbrido eléctrico. Para así, poder reducir las emisiones contaminantes que emiten los motores de combustión interna.

Para ello, de las dos opciones que se presentan en el mercado de configuración del sistema de propulsión híbrido, se elige el sistema en paralelo.

Como bien se explica en el apartado de análisis de las diferentes configuraciones híbridas, el sistema de propulsión híbrido en serie precisa de un grupo electrógeno muy potente y de elevadas dimensiones, además de un elevado coste. De otro modo, el sistema de propulsión híbrido en paralelo tiene un coste menor y sus dimensiones se reducen al tamaño de un motor eléctrico acoplado directamente al eje del motor. Su transferencia de modo eléctrico a modo térmico y viceversa, es tan sencillo y rápido como darle a un botón o bien programarlo para que pase automáticamente a través de un sistema de control. Éste, además, se puede adaptar a motores convencionales de eje, sistemas *saildrive* para veleros y, el que nos interesa más, a los sistemas IPS de Volvo Penta.

Este sistema que se propone estará formado por dos Volvo Penta IPS600 que proporcionan una potencia de 435HP cada uno de ellos, cubriendo así las necesidades de 856HP que requiera la embarcación calculados anteriormente mediante el método de Savitsky.

Al ser una embarcación de recreo tipo yate Hard Top, es importante tener en cuenta la calidad y el rendimiento en cada fase de diseño. Por eso, se elige el sistema IPS que presenta Volvo Penta frente al sistema de propulsión convencional, debido a las ventajas que presenta en todos los sentidos, sin tener en cuenta que el único inconveniente que tienen los IPS es el precio.

A estos dos motores, se les añadirá un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes a cada uno, con el objetivo de proporcionar la potencia necesaria para que la embarcación navegue mediante una propulsión totalmente eléctrica hasta los 10,5Kn, donde se observa en las gráficas de Holtrop y Pre-Savitsky de la Ilustración 15, que la embarcación empieza a tener condiciones

de pre-planeo. Además, se pretende una autonomía de 2h de navegación continua totalmente eléctrica a los 10,5Kn para ir a fondear por la costa.

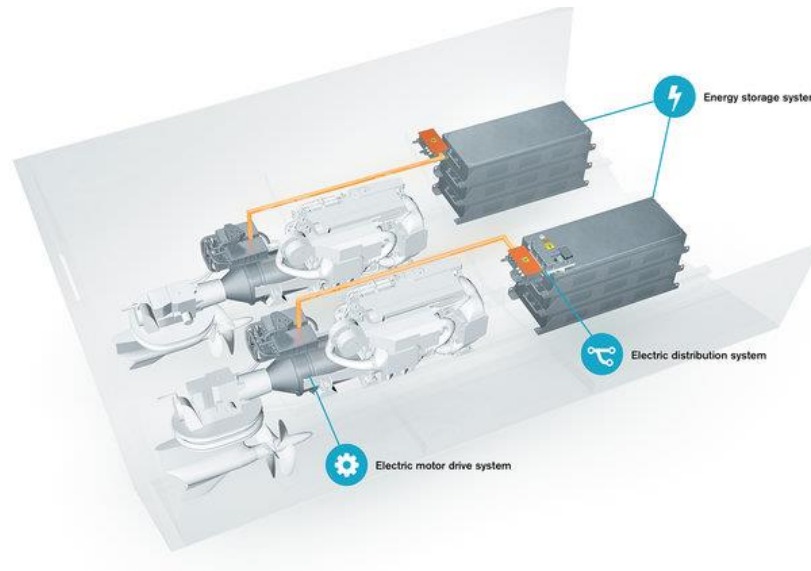


Ilustración 25. Sistema propulsión híbrido propuesto. Fuente: Página web de Volvo Penta <sup>[13]</sup>.

## 5.5. Elección del motor eléctrico

Los motores eléctricos y sus sistemas de control, los proporcionará la marca italiana Scan Diesel, ya que sus productos son motores síncronos de imanes permanentes con una gama de potencias que cubre las necesidades requeridas para la realización del proyecto.

Como se observa en la gráfica de la Ilustración 16, para una velocidad de 10,5Kn la embarcación requiere una potencia aproximada de 150KW.

Dentro de la gama de Scan Diesel, se eligen dos motores GP75 de 75KW cada uno, cubriendo así las necesidades requeridas de 150KW para las condiciones establecidas.

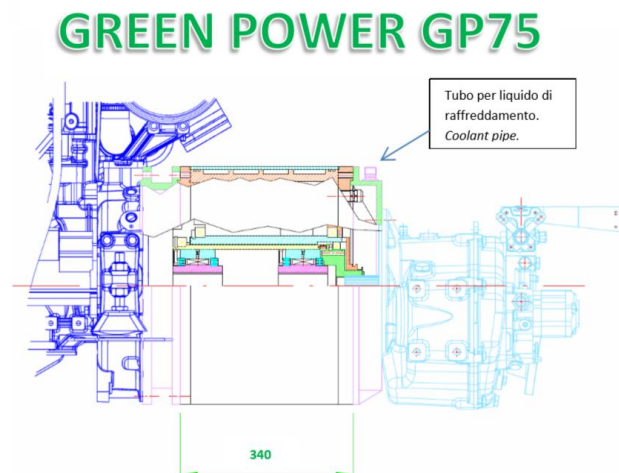
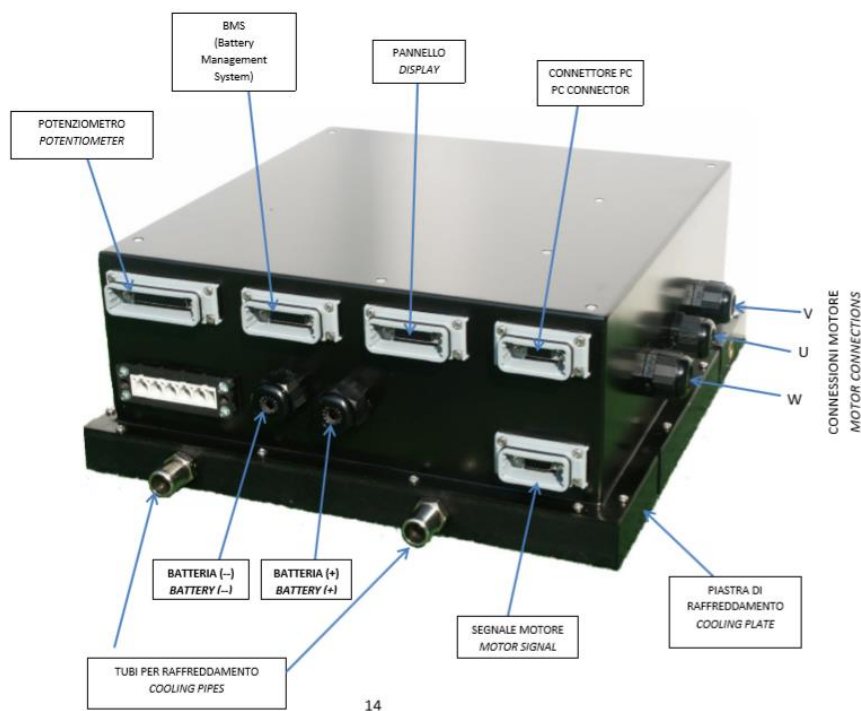


Ilustración 26. Montaje Motor GP75. Fuente: Documentación de Scan Diesel, ANEXO 1.

A estos motores eléctricos se les debe añadir un sistema de control con un inversor integrado, debido a la necesidad de controlar los parámetros que influyen en las baterías, además de convertir la corriente continua proporcionada por las baterías a la corriente alterna que necesita el motor síncrono para alimentar el estátor. Para ello, se elige la unidad de control electrónica que proporciona el mismo proveedor Scan Diesel.

Esta unidad de control actúa tanto como sistema de control, para monitorizar todos los parámetros de las baterías (voltajes, corrientes, temperatura de las celdas, etc.), como de inversor bidireccional para la inversión de corriente continua a corriente alterna.



**Ilustración 27. Unidad de control electrónica.** Fuente: Documentación de Scan Diesel, ANEXO 2.

# CAPÍTULO 6. BANCOS DE BATERÍAS

## 6.1. Configuración y clasificación de las baterías

### Configuración de los bancos de baterías

Las configuraciones de baterías que se pueden encontrar en una embarcación de recreo se clasifican en cuatro grupos, dependiendo de los servicios a los que alimentan los bancos de baterías:

- Grupo A: Un grupo o banco de baterías para alimentar el motor.
- Grupo B: Un grupo o banco de baterías para alimentar el motor y los equipos eléctricos.
- Grupo C: Dos grupos o bancos de baterías para alimentar el motor y los equipos eléctricos.
- Grupo D: Más de dos grupos o bancos de baterías para alimentar el motor, equipos eléctricos y otros servicios.

La configuración propuesta para la embarcación será del grupo D, debido a que se hará un cálculo de tres bancos de baterías distintos; baterías de arranque, banco de baterías de servicio y banco de baterías para la solución del sistema híbrido.

En las baterías de arranque, unos parámetros característicos son el CCA, en inglés *Cold Cranking Amps*, que es el corriente que puede suministrar la batería durante 30 segundos a  $-18^{\circ}$  C de temperatura, manteniendo el voltaje de salida a un valor operativo y, el MCA, en inglés *Marine Cranking power in Amps*, que es lo mismo, pero a  $0^{\circ}$ C.

### Clasificación de las baterías

Básicamente, se pueden distinguir hasta cinco tipos de baterías utilizadas en el mercado naval. En este apartado, se pretende analizar de una manera crítica y comparativa los distintos tipos de baterías en un orden ascendente, según el rendimiento y ventajas de éstas:

- Baterías de Plomo-Ácido: En su funcionamiento, la tensión de la batería aumenta hasta un valor que genera la separación del hidrógeno y oxígeno del agua destilada, por lo cual, pueden ser peligrosas y deben mantenerse ventiladas y trincadas. Además, estas baterías no son estancas, es decir, se debe mantener de manera vertical, y necesitan un mantenimiento continuo, necesitan reponer el agua destilada. Por todo ello, ya no se suelen utilizar.
- Baterías de Plomo-Calcio: Conocidas como baterías SMF, en inglés *Sealed Maintenance Free*. Son baterías cuyas placas están formadas de plomo-calcio y tienen las ventajas, frente a las baterías de plomo-ácido, de estar selladas y reducir el consumo de agua destilada, por lo que no requieren mantenimiento.

- **Baterías de Gel:** La principal ventaja de estas baterías es que tienen el electrolito en forma de gel en vez de forma líquida como las baterías de plomo, por lo que son menos propensas a derrames líquidos.
- **Baterías de electrolito absorbido:** Conocidas como baterías AGM, en inglés *Absorbed Glass Mat*. Estas baterías no utilizan electrolito en forma de líquido, por lo que se pueden manipular y distribuir en cualquier posición, ventaja importante en la distribución de las baterías en la sala de máquinas. Además, estas baterías son realmente sin mantenimiento, aunque su precio es del orden de tres veces mayor que las baterías de plomo-ácido.

Las baterías, si no se utilizan, se van descargando lentamente. Cabe destacar, que las baterías de plomo, si no se recargan, van perdiendo aproximadamente un 15% de su capacidad, mientras que las baterías de Gel o AGM lo hacen entre un 3% y un 1%.

- **Baterías de Litio:** Si se compraran estas baterías con las otras, destacan por ser las mejores que hay en el mercado en todos los aspectos funcionales, dimensionales y de rendimiento. Son baterías de tamaño reducido y ligeras, seguras, es decir, sin derrames de electrolito, acumulan grandes cantidades de energías por tamaño y peso, con un alto voltaje por celda y de descarga lineal, es decir, mientras la batería se está descargando, su voltaje prácticamente no varía, por lo que no necesitan un regulador de voltaje, y duran entre un 50% y 70% más que el resto de las baterías.

Sin embargo, su precio es mucho más elevado que el resto de baterías y presentan un comportamiento desfavorable bajo temperaturas muy extremas. Se produce una pérdida de capacidades electroquímicas ante temperaturas superiores a 50°C y una disminución del rendimiento a bajas temperaturas, reduciendo su duración hasta un 25%.

### 6.2. Cálculo de baterías

En este apartado se hará una estimación del cálculo de la capacidad de las baterías que requiere la embarcación para configurar los bancos mencionados en el apartado anterior; las baterías de servicio y las baterías del sistema híbrido.

#### **Baterías de servicio**

Se hace la estimación de la capacidad del banco de baterías de la instalación eléctrica básica de la embarcación. Para ello, se ha estimado que la embarcación esté 24h navegando sin parar a puerto para recargar las baterías.

La instalación básica consta de los siguientes equipos con sus datos técnicos, proporcionados por los fabricantes, y horas de funcionamiento estimadas:

DISPOSITIVO	Nº	A	V	W	HORAS	C (Ah)
Extractor	1	4,6	12	55,2	8	36,8
Bombas de achique	2	2,5	12	30	2	10
Bombas agua dulce	1	5	12	60	2	10
VHF	1	5,500	12	66	1	5,5
GPS	1	1,833	12	22	20	36,67
Molinete	1	83,333	12	1000	1	83,33
Luces Navegación	5	0,833	12	10	8	33,33
Iluminación	36	0,417	12	5	8	120
<b>TOTAL</b>						<b>335,633</b>
<b>TOTAL SIN MOLINETE</b>						<b>298,97</b>

Tabla 10. Equipos de la instalación eléctrica básica. Fuente: Elaboración propia.

Se van a utilizar baterías de electrolito absorbido (AGM) o de gel, debido a que el precio es mucho menor que las baterías de litio y cubren las necesidades requeridas por la instalación básica de la embarcación.

Como se utilizarán baterías AGM o de gel en muchos ciclos de vida, no se recomienda que se extraiga más del 50% de su carga, es decir, que siempre quede un 50% de la su capacidad:

$$C = C/0,5 \longrightarrow C = 671,27 \text{ Ah}$$

Y sin el molinete, puesto que éste irá conectado a las baterías de arranque del motor ya que se necesita una elevada potencia en poco tiempo:

$$C = C/0,5 \longrightarrow C = 598 \text{ Ah}$$

Las baterías deben calcularse utilizando siempre un factor de seguridad para asegurar la capacidad necesaria que requiere la embarcación. En este caso lo calculamos con el factor de seguridad de 1,5:

$$C = C \times 1,5 \longrightarrow C = 897 \text{ Ah}$$

Para cubrir las necesidades de los servicios de la instalación básica, se propone un banco de baterías con 4 baterías de gel de la marca Whisper Power, de 225Ah cada una, conectadas en paralelo.



**Ilustración 28. Batería de Gel de 225Ah y 12V.** Fuente: Página web de Whisper Power <sup>[21]</sup>.

Las baterías se cargarán de dos maneras posibles:

- Cuando la embarcación esté atracada en puerto, las baterías se cargarán por medio del cargador interno del barco, conectado a los 220V de corriente alterna del pantalán de puerto.
- Con el motor en marcha, el alternador del motor gira produciendo la tensión y la corriente necesaria. Ésta, va al regulador y después, a través de unos diodos separadores de carga, al banco de baterías.

Asimismo, las baterías podrían cargarse mediante un grupo electrógeno independiente que debería llevar la embarcación proyectada en sala de máquinas. Al tratarse de un yate tipo hard top de 13,5 metros de eslora, la embarcación podría considerarse lujosa y debería llevar hornos, frigoríficos, televisiones, y otros tipos de lujos que requieren un consumo elevado de electricidad, de 230V, que no se puede hacer frente mediante la capacidad de las baterías. Para ello, es necesaria la incorporación de un generador o grupo electrógeno que alimente las necesidades de la embarcación, además de poder cargar las baterías de servicio y/o del sistema híbrido.

En este proyecto, como ya se ha descrito en la introducción, se centra en el sistema propulsivo híbrido, por lo que no se hará el estudio del grupo electrógeno necesario para la embarcación.

### **Baterías del sistema híbrido**

En este apartado se hallaran las formulas necesarias para el cálculo de la capacidad de las baterías para el sistema propulsivo que hemos elegido.

Sabiendo que los fabricantes de motores eléctricos, como es el caso de Scan Diesel, en las especificaciones del motor dan la constante de par del motor  $K_t$ , se hallará una ecuación que permita relacionar la constante de par  $K_t$  con la tensión y capacidad requeridas por el sistema.

Sabemos que los imanes permanentes del rotor producen un flujo constante en el entrehierro, es decir, la tensión dependerá de la velocidad de giro del rotor. Entonces, se puede deducir que el valor eficaz de la tensión inducida por fase es una variable dependiente de la velocidad de giro del rotor ( $\omega_m$ ) mediante una constante ( $k_e$ ):

$$E_{ma} = \omega_m \cdot k_e \quad (E1)$$

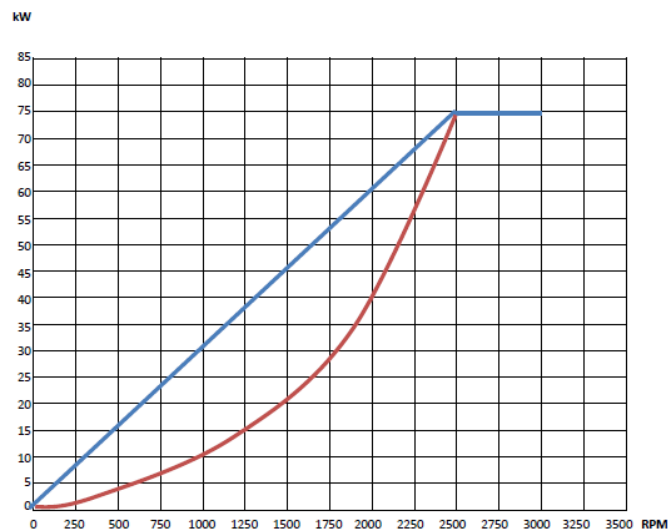
La constante de par para un sistema alimentado por corrientes trifásicas es;

$$K_T = \frac{3}{2} \cdot k_e \quad (E2)$$

El fabricante de motores Scan Diesel, en las especificaciones del motor eléctrico elegido GP75, nos dan una constante de par  $K_T$  de 2,2 Nm/A. Con lo cual, sustituyendo en las ecuaciones anteriores:

$$k_e = \frac{2}{3} \cdot 2,2 = 1,467 \frac{V}{rad \cdot s^{-1}} \quad (E3)$$

Observando la gráfica del motor GP75, se observa que el motor para llegar a la máxima potencia, debe girar a 2500 rpm.



**Ilustración 29.** Gráfica KW - RPM del motor GP75. Fuente: Documentación de Scan Diesel, Anexo 3.

Sustituyendo las rpm del motor a la ecuación desarrollada E1:

$$E_{ma} = \omega_m \cdot k_e = 2500 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 1,467 = 384,06 \text{ V} \quad (E4)$$

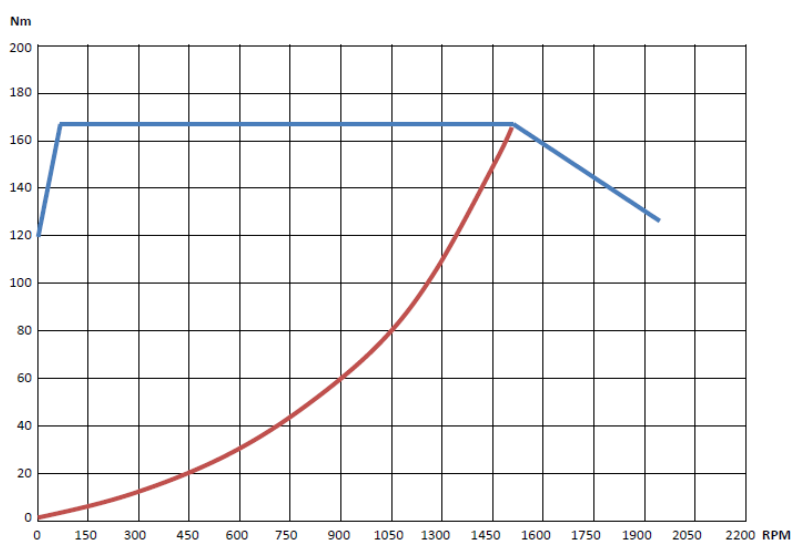
Concluyendo, sabemos que el banco de baterías deberá almacenar un voltaje mínimo de unos 384,06 V aproximadamente.



Para el cálculo de la capacidad, primero hay que hallar la cantidad de corriente, en amperios, para que el motor genere los 75KW requeridos por la embarcación proyectada.

Cogiendo la ecuación del par desarrollado para una máquina trifásica de corriente sinusoidal, hallamos la corriente necesaria:

$$M = \frac{3}{2} \cdot k_e \cdot I \longrightarrow I = \frac{2 \cdot M}{3 \cdot k_e} \quad (E5)$$



**Ilustración 30. Gráfica Empuje - RPM del motor GP75.** Fuente: Documentación de Scan Diesel, Anexo 3.

Como se puede observar en la Ilustración 30, el motor realiza un empuje máximo de 165 Nm. Sustituyendo el valor del par máximo del motor  $M$  y el valor de  $K_e$  que se ha obtenido anteriormente en la ecuación E3, hallamos el valor de la intensidad.

$$I = \frac{2 \cdot M}{3 \cdot k_e} = \frac{2 \cdot 165}{3 \cdot 1,467} = 75 \text{ A} \quad (E5)$$

Una vez obtenida la intensidad requerida para que el motor suministre los 75KW de potencia, se calcula la capacidad que deberán tener las baterías para dar la autonomía de 2h que se ha comentado en el apartado de elección del sistema propulsivo.

La capacidad de las baterías será de:

$$C = 75 \cdot 2 = 150 \text{ A}\cdot\text{h} \quad (E6)$$

Para cubrir las necesidades del sistema propulsivo, se propone equipar cada motor con dos baterías de litio de alto voltaje conectadas paralelamente para suministrar los 150 A·h requeridos. Las baterías elegidas son las *Deep Blue BMWi3* de la empresa Torqueedo ya que cumplen las necesidades requeridas por el sistema propulsivo.



**Ilustración 31. Batería Deep Blue BMWi3.** Fuente: Página web de Torqueedo [23].

# CAPÍTULO 7. VIABILIDAD ECONÓMICA

En este apartado se estudiará la viabilidad económica del sistema híbrido-eléctrico frente al sistema de propulsión convencional además de, la amortización del sistema en el tiempo.

## 7.1. Coste del sistema propulsivo elegido

Se pretende analizar y calcular el valor del sistema propulsivo híbrido, y analizar el sobrecoste del sistema de hibridación sobre el sistema IPS de Volvo Penta.

Sistema Híbrido	
Producto	Coste (€)
Motor IPS600	222.911,00
Hybrid System Scan Diesel	24.000,00
Baterías Deep Blue BMWi3	32.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>278.911,00</b>

Tabla 11. Presupuesto del sistema híbrido. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que en el presupuesto presentado, en el sistema de hibridación del motor de la empresa Scan Diesel se ha hecho una estimación del presupuesto de 12000 cada uno, debido a que se ha eliminado de la página web la información necesaria para encontrar el presupuesto del GP75 y se ha aproximado partiendo del presupuesto que se conocía del GP15 de unos 5000-6000€.

Todos los precios son los PVP del producto obtenidos a través de documentación conseguida de los fabricantes, sin tener en cuenta los posibles descuentos que realizan las empresas a los clientes por la compra del producto.

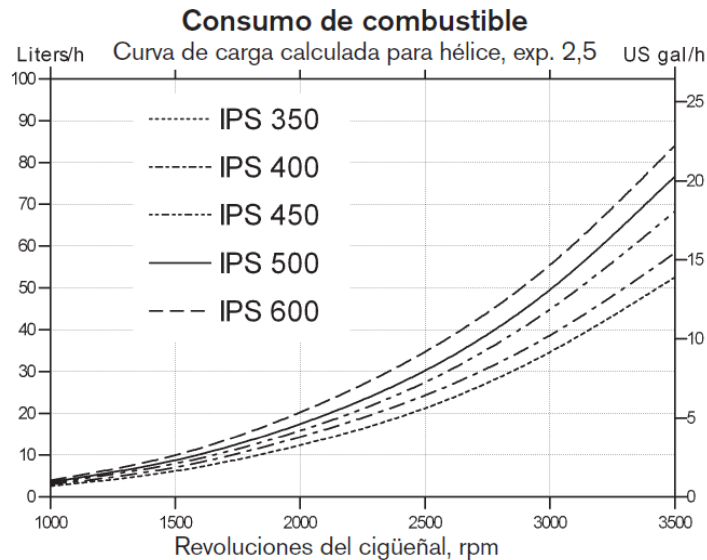
Como se observa en el presupuesto, estamos incrementando en 56.000€ el sistema de propulsión IPS600 propulsado por diesel.

## 7.2. Viabilidad económica del sistema híbrido

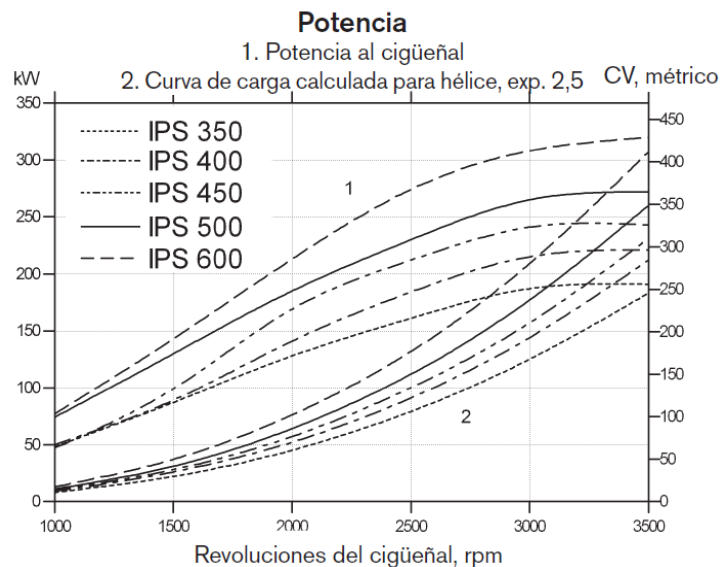
A continuación, se estudiará la viabilidad económica y la amortización del sistema híbrido. Para ello, lo primero que se tiene que calcular es el ahorro de combustible que proporciona el sistema híbrido-eléctrico cuando navega a las condiciones que se le ha requerido a la embarcación.

$$\text{Ahorro de combustible} = \text{Autonomía} \cdot \text{Consumo del motor}$$

La autonomía es la de la embarcación navegando con el sistema eléctrico en horas. Si recordamos se había hecho el estudio con el requerimiento de que la embarcación navegase a 10,5Kn durante 2h de servicio.



**Ilustración 32. Consumo de combustible de los sistemas IPS.** Fuente: Documentación de Volvo Penta, Anexo 4.



**Ilustración 33. Relación Potencia-RPM de los sistemas IPS.** Fuente: Documentación de Volvo Penta, Anexo 4.

Observando los gráficos de la Ilustración 32 e Ilustración 33 y sabiendo que le exigimos a la embarcación una velocidad de 10,5Kn para navegar durante 2h de una manera totalmente eléctrica, se observa que a los 150KW el motor se revoluciona hasta las 1500rpm con un consumo de 10l/h.

Sustituyendo en la ecuación del ahorro de combustible:

$$\text{Ahorro de combustible} = 2h \cdot 10l/h = 20l$$

Una vez obtenido el ahorro de combustible mínimo diario, se analizará el tiempo de amortización del sobrecoste del sistema híbrido. Se dice que es el ahorro de combustible mínimo, debido que se realiza el estudio a la plena carga de trabajo que se le exige que deba aguantar el sistema, es decir, navegando a 10,5Kn durante 2h seguidas sin recargar baterías.

Para analizar el tiempo de amortización del sistema, se hace la estimación de que la embarcación saldrá a navegar durante 3 meses al año, es decir unos 100 días de funcionamiento al año aproximadamente.

Como se puede observar en la Ilustración 34 de la página web Datos Macro de Expansión <sup>[24]</sup>, nos aparece la evolución del precio medio de los combustibles en España. En este momento, el precio del Diesel está a 1,208€ de media.

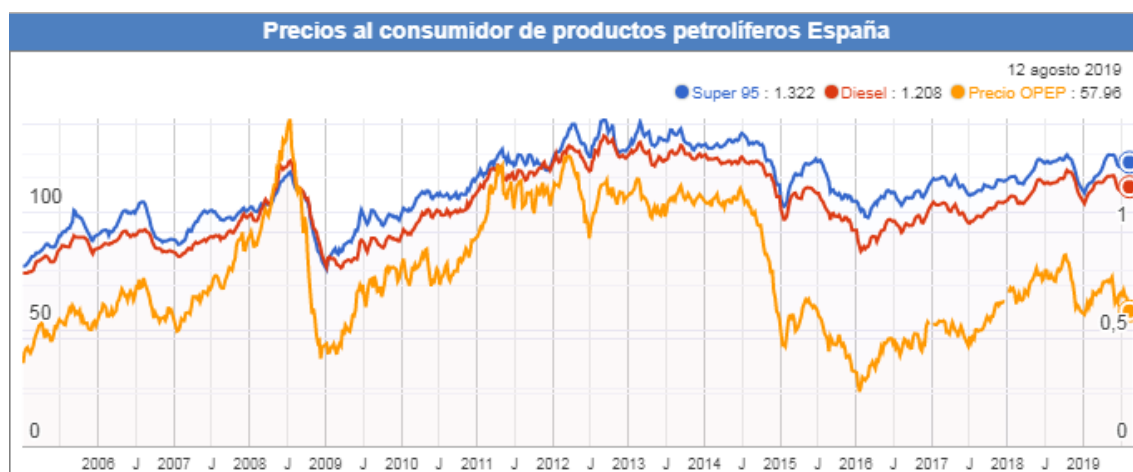


Ilustración 34. Precios al consumidor de productos petrolíferos en España. Fuente: Página web de Datos Macro<sup>[24]</sup>.

Se calcula el ahorro de combustible anual en € durante los 100 días de funcionamiento al año:

$$\text{Ahorro de combustible anual} = 20l/\text{día} \cdot 100\text{días/año} \cdot 1,208€/l = 2.416€/\text{año}$$

Como se ha comentado en el apartado anterior, el sistema híbrido añade un sobrecoste al sistema propulsivo IPS de 56.000€ por hacerlo híbrido. Conociendo el sobrecoste y el ahorro de combustible anual, se puede calcular la amortización en años:

$$\text{Amortización} = \text{Sobrecoste} / \text{Ahorro de combustible anual}$$

$$\text{Amortización} = 56.000€ / 2.416€/\text{año} = 23,178 \text{ años}$$

Concluyendo, la inversión del sistema híbrido se amortizaría con más de 23 años. Con lo cual, ya se puede adelantar la conclusión de que el sistema híbrido propuesto es inviable económicamente.

# CONCLUSIONES

El planeta, cada vez más, necesita alternativas sostenibles para combatir la contaminación. Como se ha descrito en este proyecto, los gobiernos ya están empezando a tomar medidas en cuanto a las emisiones generadas por la propulsión del sector automovilístico y del sector naval. Motivando, mediante instrumentos financieros, a que las empresas inviertan más recursos en I+D para el desarrollo de sistemas de propulsión alternativos.

Gracias a la conciencia medioambiental que están tomando las empresas y sus inversiones en I+D en sistemas de propulsiones alternativos en el sector naval, han surgido empresas nuevas con una conciencia ecológica como Green Line Yacht <sup>[25]</sup>, con sus barcos diseñados con una propulsión totalmente híbrida, alimentada con energía solar. Además, esta inversión ha logrado que empresas con una larga historia en el sector naval como Nanni [14], inventen nuevos sistemas de propulsión híbrida, empujando a la competencia a desarrollar proyectos de propulsión híbrido-eléctrica, como es el caso de Volvo Penta, que ya tiene fecha de presentación de su nuevo proyecto de propulsión híbrida en 2021.

En resumen, con el estudio desarrollado en proyecto podemos llegar a las siguientes conclusiones:

## **Conciencia medioambiental:**

A pesar de la inviabilidad económica del proyecto, se constata la evolución que está tomando el sector naval y la inversión que están haciendo las empresas en I+D para sacar al mercado nuevos proyectos de propulsión alternativa a la convencional, es solo una cuestión de tiempo que la viabilidad económica de la propulsión híbrido-eléctrica para todo tipo de embarcaciones sea factible.

Gracias a la implicación de los gobiernos, la conciencia medioambiental y la investigación a la que se ven abocadas las empresas, se prevé que, en un futuro próximo, el rendimiento de los motores eléctricos y de las baterías aumentará y su precio, en cuanto a más disponibilidad, innovación y rendimiento, se verá reducido, haciendo viable los proyectos con una propulsión híbrido-eléctrica.

## **Viabilidad del sistema híbrido-eléctrico:**

Como se ha comentado antes, por ahora, no es viable económicamente la implementación de sistemas híbridos en embarcaciones de recreo de altas velocidades, ya que requieren de elevadas potencias para su propulsión y el tiempo de navegación se reduce a tres meses al año, aumentando así, el periodo de amortización del sistema híbrido. A pesar de ello, no quiere decir que el proyecto sea inviable en todo tipo de embarcaciones, pues en embarcaciones de velocidades más reducidas y que naveguen durante períodos más largos, como podrían ser

barcos pesqueros, mercantes o ferris, podría ser un proyecto viable dado que, en este escenario de navegación permanente o prolongada, es posible que puedan reducir los costes de combustible anuales y en consecuencia, garantizar un tiempo de amortización razonable que permita migrar hacia estos sistemas.

Además, se podría aumentar el rendimiento de las baterías y su período de trabajo si se utilizasen sistemas alternativos de recarga cinética o solar, como, por ejemplo; aerogeneradores, placas solares, velas rígidas, recargas mediante la energía cinética de la hélice, etc.



# BIBLIOGRAFÍA

### Normativas:

UNE-EN ISO 8666:2002. Pequeñas embarcaciones. Datos principales.

UNE-EN ISO 10133:2013. Embarcaciones de recreo. Sistemas eléctricos. Instalaciones de corriente continua a muy baja tensión.

UNE-EN ISO 13297:2015. Embarcaciones de recreo. Sistemas eléctricos. Instalaciones de corriente alterna.

### Libros:

Larsson, L., Eliasson, R. (2007) "*Principles of Yacht Design*" (2ª ed.) Londres: Adlard Coles Nautical.

### Páginas Web:

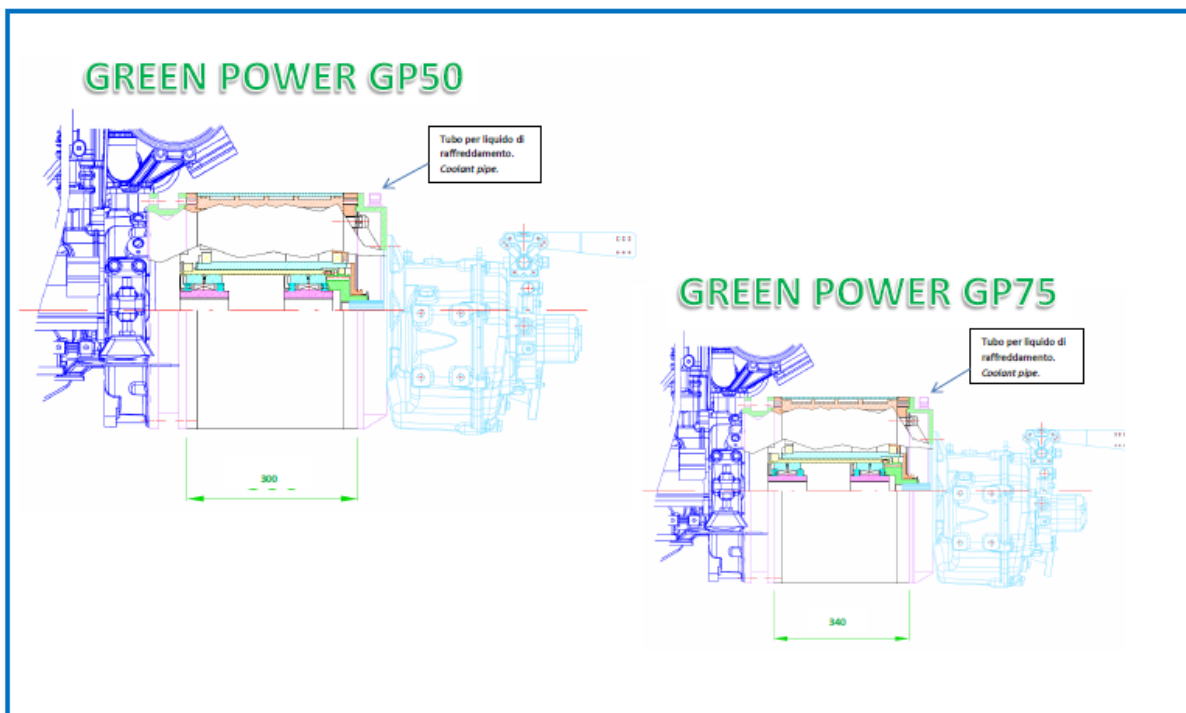
- [1]. Artículo de Fiordos noruegos, Diario El Periódico: <https://elperiodicodelaenergia.com/los-fiordos-noruegos-declarados-zona-cero-emisiones-para-2026/>
- [2]. Datos y Estadísticas de la Asociación Nacional de Empresas Náuticas (ANEN): <http://www.anen.es/las-embarcaciones-de-recreo-registran-un-848-mas-de-matriculaciones-en-2015/>
- [3]. Web de la marca Sea Ray: <https://global.searay.com/>
- [4]. Web de la marca Cranchi: <http://www.cranchi.com/>
- [5]. Web de la marca Fairline Yachts: <https://www.fairline.com/es/>
- [6]. Web de la marca Princess Yachts: <https://es.princessyachts.com/>
- [7]. Web de la marca Azimut: <https://es.azimutyachts.com/>
- [8]. Web de la marca Sunseeker: <https://www.sunseeker.com/en-GB/>
- [9]. Web de la marca Sessa Marine: <https://www.sessamarine.com/es/>
- [10]. Web de la marca Rio Yachts: <https://www.rioyachts.net/en/>
- [11]. Cranchi M44: <http://www.cranchi.com/ranges/m-44-ht/>
- [12]. Sistemas IPS, de Volvo Penta: <https://www.volvopenta.es/marineleisure/es-es/products/info/for-motor-yachts/volvo-penta-ips.html>
- [13]. Hybrid Marine Propulsion Concept, de Volvo Penta: <https://www.volvopenta.com/marineleisure/en-en/news/2018/jun/volvo-penta-unveils-hybrid-marine-propulsion-concept.html>
- [14]. Hybrid System, de Nanni Engines: <https://www.nannienergy.com/downloads/brochures/HybridSystem-GB.pdf>
- [15]. Propulsión Híbrida en Serie y en Paralelo, de Náutica y Yates: <https://www.nauticayates.com/equipo/la-propulsion-hibrida-propulsion-hibrida-en-serie-y-en-paralelo-una-alternativa-ecologica/>

- [16]. Conceptos básicos de máquinas de corriente continua (2011). De Alfonso, Mariano:  
[https://www.researchgate.net/profile/Marino\\_Pernia/publication/235752021\\_Conceptos\\_Basicos\\_de\\_Maquinas\\_de\\_corriente\\_continua/links/0912f5131e8e23bfa1000000/Coneptos-Basicos-de-Maquinas-de-corriente-continua.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marino_Pernia/publication/235752021_Conceptos_Basicos_de_Maquinas_de_corriente_continua/links/0912f5131e8e23bfa1000000/Coneptos-Basicos-de-Maquinas-de-corriente-continua.pdf)
- [17]. Motor de corriente Continua, de Wikipedia  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Motor\\_de\\_corriente\\_continua](https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corriente_continua)
- [18]. Motores de Imanes Permanentes, de Monografías:  
<https://www.monografias.com/trabajos100/motores-iman-permanentes/motores-iman-permanentes.shtml>
- [19]. Motores de Imanes Permanentes, de Revista Electroindustria:  
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1588&srch=mantenimiento&act=3>
- [20]. Power Electronics. 2ª ed, 1995 New York:  
[https://books.google.es/books?id=noV7iKthMJwC&pg=PA478&lpg=PA478&dq=Power+Electronics.+2%C2%AA+ed,+1995+New+York&source=bl&ots=TUEin2na7v&sig=ACfU3U1q1p-hXmJub4XcWEWBZ3VMamvEQA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwicwZ6J7\\_kAhVOBWMBHS1FDC8Q6AEwAHoECAgQAQ#v=onepage&q=Power%20Electronics.%20%C2%AA%20ed%2C%201995%20New%20York&f=false](https://books.google.es/books?id=noV7iKthMJwC&pg=PA478&lpg=PA478&dq=Power+Electronics.+2%C2%AA+ed,+1995+New+York&source=bl&ots=TUEin2na7v&sig=ACfU3U1q1p-hXmJub4XcWEWBZ3VMamvEQA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwicwZ6J7_kAhVOBWMBHS1FDC8Q6AEwAHoECAgQAQ#v=onepage&q=Power%20Electronics.%20%C2%AA%20ed%2C%201995%20New%20York&f=false)
- [21]. Batería de Gel, de Whisper Power:  
<https://www.whisperpower.com/es/4/9/220/productos/batteries/gel-battery-12-v-225-ah.html>
- [22]. Deep Blue: La bacteria del BMW i3 ahora también en el agua, de:  
<https://movilidadelectrica.com/deep-blue-la-bateria-del-bmw-i3-ahora-tambien-agua/>
- [23]. Baterías de Torqeedo: <https://www.torqeedo.com/es/t%C3%A9cnica-y-medio-ambiente/battery-technology.html>
- [24]. Precios derivados del petróleo en España, de DatosMacro Expansión:  
<https://datosmacro.expansion.com/energia/precios-gasolina-diesel-calefaccion/espana>
- [25]. Página Web de Green Line Yacht: <https://www.greenlinehybrid.si/>

# ANEXO 1. GREEN POWER GP75, SCAN DIESEL



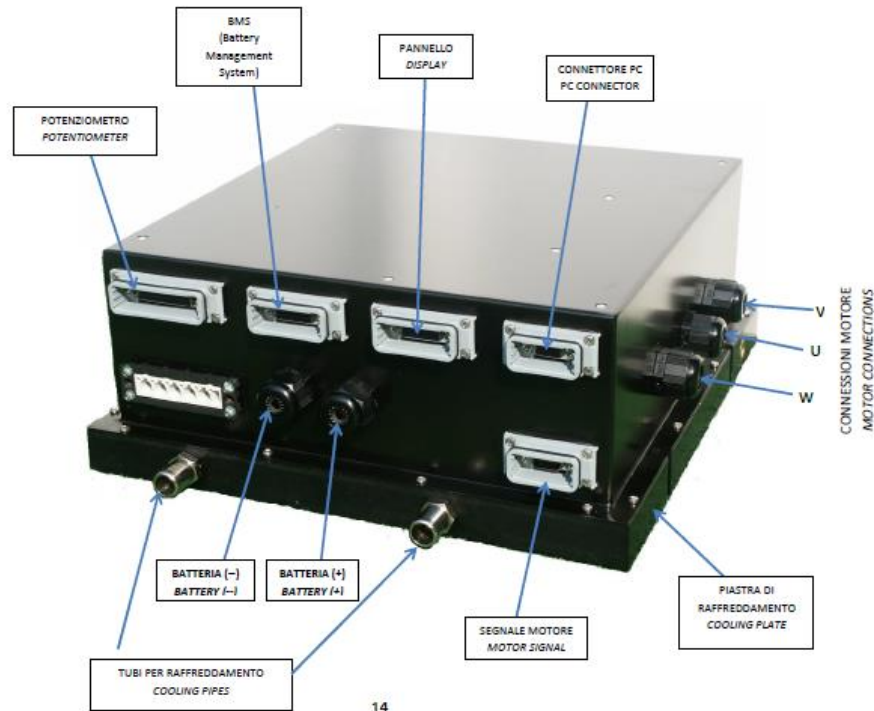
## Esempio di Montaggio – Assembly Example



# ANEXO 2. UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICA, SCAN DIESEL



Scatola di controllo elettronica – *Electronic control box*

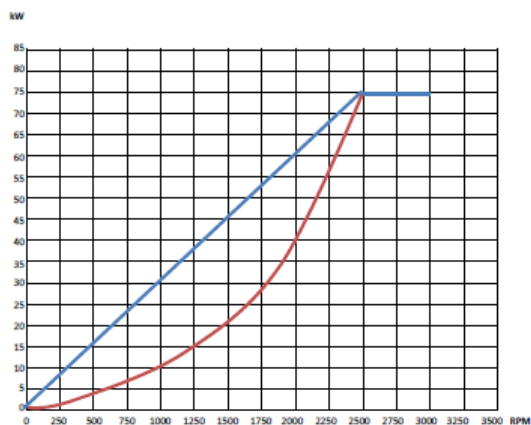
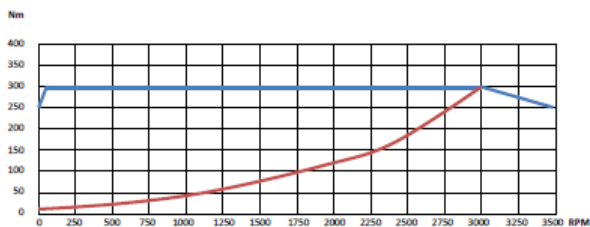
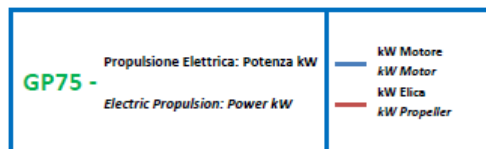
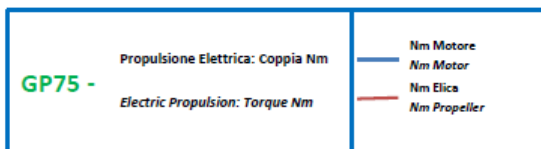


14

# ANEXO 3. GRÁFICAS MOTOR GP75, SCAN DIESEL



## GP75 Diagrammi di Coppia & Potenza – Torque & Power Diagram



# ANEXO 4. GRÁFICAS SISTEMA IPS600.

VOLVO PENTA **INBOARD PERFORMANCE SYSTEM**

## IPS 350/400/450/500/600



### Datos Generales

Modelo del sistema	IPS300	IPS400	IPS450	IPS500	IPS600
Cilindrada, l	3,7	3,7	5,5	5,5	5,5
Número de cilindros y configuración	4 en línea	4 en línea	6 en línea	6 en línea	6 en línea
Potencia al cigüeñal, MW (CV) @ 3500 rpm	191 (260)	221 (300)	243 (330)	272 (370)	320 (433)
Potencia al eje de la hélice, MW (CV) @ 3500 rpm	182 (248)	212 (289)	230 (314)	259 (352)	307 (418)
Aspiración	Turbo, aftercooler, compresor	Turbo, aftercooler, compresor	Turbo, aftercooler, compresor	Turbo, aftercooler, compresor	Turbo, aftercooler, compresor
Potencia	R5**	R5**	R4* & R5**	R5**	R5**
Peso del paquete, kg	780	780	863	887	901
Serie de hélices	T2-T10, TS3-TS6	T2-T10, TS3-TS6	T2-T10, TS3-TS6	T2-T10, TS3-TS6	T2-T10, TS3-TS6
Voltaje	12 V	12 V	12V o 24V	12V o 24V	12V o 24V

Límites de emisiones: IMO NOx, EU RCD, US EPA Tier 3

Aplicación: En instalaciones dobles o múltiples en embarcaciones de planeo

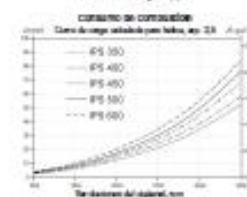
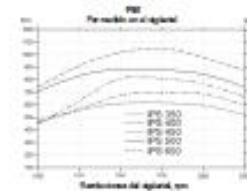
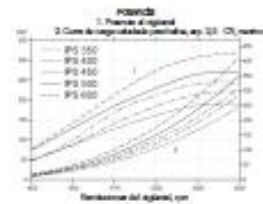
Gama de velocidades: 20 a 45 nudos

Conexión motor: Compacto (de serie), eje de unión como opción

Datos técnicos según ISO 8665. El poder calorífico inferior del combustible es de 42.700 kJ/kg y la densidad de 840 g/litro a 15°C. Combustibles comerciales pueden desviarse de esta especificación, lo que influirá la potencia y el consumo de combustible.

\*R4. Para embarcaciones planeadoras ligeras en operaciones comerciales

\*\*R5. Para aplicaciones en embarcaciones de recreo. También puede usarse para embarcaciones planeadoras de alta velocidad en aplicaciones comerciales



**VOLVO PENTA**

# ANEXO 5. PRECIOS DE VENTA AL PÚBLICO DE VOLVO PENTA

Volvo Penta IPS 1) 2)										
Model	Gearbox/drive type	Propellershaft-power kW / hp	Crankshaft-power kW / hp	RPM U / min	TYPE Cylinder-quantity	Stroke-volume ( liter )	Weight kg 4)	Price EURO excl. VAT	Emission - Certificate	Price EURO incl. 25% VAT
IPS 350	D4	182 / 248	191 / 260	3500	4	3,7	780	131.034,08	4 5 7 8 S	163.793,00
IPS 400	D4	212 / 289	221 / 300	3500	4	3,7	780	141.962,08	4 5 7 8 S	177.453,00
IPS 450	D6	230 / 314	243 / 330	3500	6	5,5	863	149.714,08	4 5 7 8 S	187.143,00
IPS 500	D6	259 / 352	272 / 370	3500	6	5,5	887	157.264,08	4 5 7 8 S	196.581,00
IPS 600	D6	307 / 418	320 / 435	3500	6	5,5	901	178.328,08	4 5 7 8 S	222.911,00
IPS 700	D8	378 / 515	405 / 550	2900	6	7,7	1390	215.857,00	4 5 7 8 S	269.822,00
IPS 800	D8	419 / 570	441 / 600	3000	6	7,7	1390	246.059,00	4 5 7 8 S	307.574,00
IPS 800	D11	478 / 650	493 / 670	2450	6	10,8	1800	263.462,00	4 5 7 8 S	329.328,00
IPS 950	D11	517 / 703	534 / 725	2500	6	10,8	1800	326.550,00	4 5 7 8 S	408.188,00
IPS 1050	D13	570 / 755	588 / 800	2300	6	12,8	2300	380.246,00	4 5 7 8 S	475.308,00
IPS 1200	D13	636 / 864	662 / 900	2300	6	12,8	2300	461.724,00	4 5 7 8 S	577.155,00
IPS 1350	D13	693 / 942	735 / 1000	2400	6	12,8	2460	547.204,00	4 5 7 8 S	684.005,00

**Delivery-content**

**Saidrive**

Engine, Saidrive; **No engine bed**  
 EVC-Instrument with control-panel and cable-slang  
 without Propeller, without engine-bed  
 Options see Accessories-list  
 - more instrumentations etc against surcharge available on request

**Reverse-Gearboxes**

Engine, reverse-gear  
 EVC-Instrument with control-panel (Compact Diesel)  
 EVC EC-engines incl electronic Control-lever for shift/speed  
 el. Cable, without Propeller, see Accessories-list

**Volvo Penta IPS**

EVC-EC engine, Volvo Penta IPS drive incl electronic  
 Control-lever for shift/engine-speed  
 Steering-system electrical  
 EVC-Instrument with control-panel  
 without Propeller, see Access. list

