

Trabajo Final de Grado

## Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

# Diseño conceptual y viabilidad de una embarcación eléctrica

## MEMORIA

**Autor:** Rubén Arguedas Navarrete  
**Director:** Dr. Emilio Angulo Navarro  
**Convocatoria:** Septiembre 2019



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## **Resum**

El projecte consisteix en el disseny d'una embarcació elèctrica amb l'objectiu de transportar vehicles i persones d'un costat a l'altre del riu Guadalquivir al seu pas per la localitat de Coria del Río, amb un recorregut de 190 m per cada encreuament i en un horari de treball de més de 14 hores diàries.

És per això que aquest projecte desenvolupa una barcaça elèctrica capaç de donar una resposta a unes demandes de treball i que pot substituir d'altres barcaçes impulsades amb motor dièsel. L'alimentació de les bateries es porta a terme amb generació d'energia fotovoltaica dissenyada i localitzada al costat de l'embarcador i que produeix energia suficient per a dotar-la d'autonomia. Així doncs, un projecte 100% sostenible.

Es tracta d'un projecte que proposa la substitució de barcaçes contaminants per embarcacions elèctriques totalment respectuoses amb el medi ambient i vol incidir en la necessitat d'un canvi en l'obtenció i l'ús de l'energia.

## Resumen

El proyecto consiste en el diseño de una embarcación eléctrica con el fin de transportar vehículos y personas de un lado a otro del río Guadalquivir a su paso por la localidad de Coria del Río, con un recorrido de 190 m en cada cruce y en un horario de trabajo de más de 14 horas diarias.

Así pues, este proyecto desarrolla una barcaza eléctrica capaz de responder a unas demandas de trabajo que puede sustituir a otras impulsadas con motor diésel. La alimentación de las baterías se lleva a cabo con generación de energía fotovoltaica diseñada y localizada al lado del embarcadero y que produce energía suficiente para dotarla de autonomía. Es por tanto un proyecto 100% sostenible

Se trata de un proyecto que propone la sustitución de barcas contaminantes por embarcaciones eléctricas totalmente respetuosas con el medio ambiente y quiere incidir en la necesidad de un cambio en la obtención y uso de la energía.

## **Abstract**

The project is about design of an electric boat with the purpose of transporting vehicles and people from one side of the Guadalquivir river to another in its passage through the town of Coria del Río, with a route of 190 m per trip and a schedule of more than 14 hours a day.

This project develops an electric barge capable of responding to conditions that can replace other diesel-powered ones. The batteries are charged by photovoltaic power generation which is placed next to the pier and producing enough energy to provide autonomy. Completing a 100% sustainable project.

This is a project that proposes the replacement of polluting barges for electric vessels that are totally environmentally friendly and wants to influence the need for a change in the obtaining and use of energy.

## Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a la empresa Transportes Fluviales de Coria del Río de Sevilla por su ayuda en la obtención de los datos e informaciones que han sido muy útiles para desarrollar este proyecto. Especialmente a Manuel Díaz, que me remitió toda la documentación e información requerida sobre aspectos de su empresa, respondiendo a mi petición de ayuda a través del correo electrónico.

En segundo lugar, gracias a mi tutor Emilio Angulo Navarro por admitirme como tutorando, guiarme y ayudarme a orientar y clarificar mis objetivos y fomentar en mí el deseo de profundizar en el tema sugerido.

Por último, me gustaría dar las gracias a mi familia, que siempre ha sabido aconsejarme y me ha apoyado a lo largo del proyecto.

# Índice

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>IV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
1.1. Objetivos del trabajo	8
1.2. Alcance del trabajo	8
1.3. Prefacio	9
1.3.1. Origen del trabajo	9
1.3.2. Motivación	10
1.3.3. Requerimientos previos	12
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>13</b>
<b>3. ESPECIFICACIONES</b>	<b>16</b>
3.1. La flota	16
3.2. Servicio	17
3.2.1. Cruce	17
3.2.2. Fases del cruce	17
3.2.3. Viajes diarios	20
3.3. Carga del barco	21
<b>4. VIABILIDAD ENERGÉTICA DEL PROYECTO</b>	<b>23</b>
4.1. Diseño conceptual de la barcaza	23
4.1.1. Dimensiones del casco	23
4.1.2. Sistema de propulsión	24
4.1.3. Otros elementos estructurales	25
4.1.4. Elaboración del diseño	26
4.2. Cálculos del trayecto	27
4.2.1. Peso del barco	27
4.2.2. Calado de la barcaza	28
4.2.3. Estudio de fuerzas	30
4.2.4. Mejora hidrodinámica de la geometría	31
4.3. Cálculo de necesidad de propulsión	32
4.3.1. Selección del motor	32
4.3.2. Estudio de la viabilidad del motor	33

<b>5.</b>	<b>SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA BARCAZA</b>	<b>40</b>
5.1.	Los motores y otros componentes .....	40
5.2.	Control de la barcaza.....	43
<b>6.</b>	<b>CÁLCULOS ENERGÉTICOS DE LA BARCAZA</b>	<b>45</b>
6.1.	Energía por cruce.....	45
6.2.	Necesidades energéticas .....	45
6.2.1.	Tiempo de parada .....	46
6.2.2.	Balance de carga.....	47
<b>7.</b>	<b>EL PROYECTO FOTOVOLTAICO</b>	<b>50</b>
7.1.	Especificaciones.....	50
7.1.1.	Paneles fotovoltaicos.....	50
7.2.	Diseño conceptual de la instalación .....	53
7.2.1.	Cálculos de la instalación .....	54
7.2.2.	Selección de los elementos de la instalación.....	56
7.2.3.	Conexión de la instalación.....	61
7.2.4.	Dimensiones de la instalación .....	62
<b>8.</b>	<b>PRESUPUESTO DEL PROYECTO</b>	<b>65</b>
<b>9.</b>	<b>IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>67</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>69</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>75</b>
A1.	Plano de la embarcación .....	76
A2.	Simulación en ANSYS .....	77
A3.	Resultados simulación de geometría definitiva.....	88
A4.	Todos los componentes de a bordo del barco.....	90
A5.	Ficha técnica del panel Solar utilizado.....	91
A6.	Tabla de precios según el vehículo del paso de Coria .....	92



# 1. Introducción

En un mundo cada vez más consciente de la problemática del medio ambiente, alertado de que son necesarios cambios en el uso de la energía, la ingeniería ha de ser capaz de dar respuestas a estos retos del futuro y seguir satisfaciendo nuestras necesidades.

En el trabajo se presenta el desarrollo de una embarcación eléctrica destinada a sustituir otras embarcaciones que utilizan motor diésel que actualmente proporcionan transporte de personas, vehículos y mercancías en la localidad de Coria del Rio, facilitando el paso del Guadalquivir. Además, se diseña una central fotovoltaica que es capaz de alimentar las baterías de esta embarcación. Supone un cambio hacia una movilidad sostenible impulsando la implantación del motor eléctrico en el diseño naval (sector poco penetrado por la tecnología eléctrica) y una apuesta por la energía solar.

El objetivo del proyecto es pues, el desarrollo conceptual y la viabilidad de una embarcación de propulsión eléctrica con baterías y con generación de energía mediante células fotovoltaicas. También es un intento de aplicar los motores eléctricos a nuevos sectores que sirva de modelo o motivación para impulsar proyectos similares.

Para alcanzar este objetivo ha sido necesario en primer lugar estudiar la situación de la que partimos, especialmente en dos aspectos, la oferta de barcos eléctricos y el desarrollo de las baterías. Posteriormente se ha diseñado el barco teniendo en cuenta todos los requisitos necesarios para que sea capaz de sustituir a los barcos diésel, también se han realizado los cálculos necesarios para asegurar su eficiencia. Además, se ha tenido que diseñar una central fotovoltaica capaz de alimentar las baterías del barco.

Las fuentes utilizadas para desarrollar el proyecto han sido, en primer lugar, el análisis de informaciones diversas publicadas en artículos, webs y videos. En segundo lugar, se ha contactado con la empresa Transportes Fluviales Coria, S.L. que ha proporcionado la información necesaria para contextualizar el proyecto.

El proceso de evolución existe en todos los aspectos que forman parte de la vida. Las especies hemos evolucionado, la sociedad ha evolucionado, la tecnología ha evolucionado, lo mismo debe ocurrir con el uso de las energías.

## 1.1. Objetivos del trabajo

Como ya se ha señalado el objetivo general del trabajo es el desarrollo conceptual y el estudio de la viabilidad de una embarcación de propulsión eléctrica con baterías y con generación de energía mediante células fotovoltaicas. Se trata de un objetivo general del que se desprenden los siguientes objetivos específicos:

1. Decidir qué tipo de embarcación es el más adecuado para llevar a cabo el proyecto.
2. Identificar un supuesto real al que aplicar el estudio.
3. Investigar la disponibilidad de diferentes baterías.
4. Diseñar la arquitectura conceptual de la barcaza.
5. Realizar los cálculos necesarios para elegir los motores de propulsión.
6. Estudiar la viabilidad económica.
7. Desarrollar un proyecto fotovoltaico que alimente a las baterías.
8. Constatar el impacto positivo medioambiental que supone la aplicación de motores eléctricos a las embarcaciones.

## 1.2. Alcance del trabajo

El proyecto requiere de un amplio conocimiento y una alta cantidad de trabajo, en muchos casos especializada y realizada por un equipo, para conseguir matizar todos los temas que abarca, algunos no han podido ser matizados debido a la falta de información referida al servicio o a las limitaciones de programas. Es por eso por lo que se trata de un diseño conceptual y la embarcación requiere de una investigación posterior para matizar algunos campos. Se ha realizado un listado de todos los requerimientos que presenta el diseño y el grado de profundidad al que se ha llegado en este trabajo.

- Investigación de la situación en la que se encuentra la aplicación del motor eléctrico en embarcaciones en la actualidad.
- Estudio del caso donde se implementará el servicio de la barcaza eléctrica.
- Diseño conceptual de la embarcación salvando todos los condicionantes de cálculos estructurales.
- Cálculo íntegro de las exigencias técnicas requeridas por la embarcación para efectuar el servicio correctamente. Se incluye la fuerza requerida por los motores, su potencia y la capacidad de las baterías.
- Selección de los componentes que forman tanto el sistema de propulsión como una función de a bordo, así como su conexión.
- Cálculo del control necesario para manejar la barcaza.

- Cálculo completo de las necesidades energéticas de una planta solar capaz de alimentar a la barcaza los 365 días del año donde también se han seleccionado los componentes principales.
- Análisis de datos: eficiencia del servicio, impacto ambiental y económico.

El proyecto completa la gran parte del diseño de la embarcación y marca la ruta de trabajo. Se supone que una vez concluido el proyecto y estudiada la viabilidad, con el visto bueno de la empresa, se acabarían de definir todos los puntos y el estudio podría ser ejecutado en la vida real. Los puntos que requieren de una mayor profundidad para concluir el trabajo son:

- Cálculo estructural y diseño detallado de la barca (fuerzas que debe soportar la estructura, material óptimo, diseño del esqueleto del casco, cumplimiento de la normativa).
- Estudio de las hélices, sus propiedades y condiciones de trabajo.
- Cálculo de las necesidades de las baterías de almacenamiento.
- Test de simulación con prototipos.
- Estudio económico completo.

### 1.3. Prefacio

Para mi Trabajo Final de Grado (TFG) siempre había pensado que era interesante elegir un tema que me permitiera aplicar mis conocimientos teóricos a una situación real. En este proyecto se ha cumplido este objetivo según veremos a continuación.

Diseñar una embarcación eléctrica para que sustituya a otras de motores diésel que en la actualidad están ofreciendo un servicio real es un proyecto apasionante que supone investigar, calcular, meditar, aplicar conocimientos y tomar decisiones que conllevan unas consecuencias.

Un estudio que parte de una idea que se va concretando día a día, pero que a la vez aparecen nuevos problemas a los que hay que dar solución, que generan nuevas perspectivas, nos pone frente a la realidad de la complejidad de cerrar un proyecto.

#### 1.3.1. Origen del trabajo

El tema de este TFG me fue propuesto por mi tutor Emilio Angulo Navarro. Aunque no era conocedor del sector naval, desde el principio me atrajo el proyecto ya que suponía un reto que implicaba la necesidad de investigar y ponerme al día sobre el citado sector y además respondía a mi interés de aplicar fuentes energéticas que respetan el medio ambiente y así colaborar a la transición energética planteando alternativas.

## 1.3.2. Motivación

### 1.3.2.1. Motivación personal

Durante mis estudios de grado he pensado que, aparte de la realización programada de las asignaturas que lo componen, en mi caso las del grado de ingeniería en tecnologías industriales, es muy importante desarrollar otro tipo de habilidades y adquirir una serie de experiencias y vivencias que te ayuden a formarte más allá de la rutina de ir a clase y estudiar. Esta manera de pensar me hizo disfrutar de un semestre de Erasmus en el Politecnico di Torino en Italia durante el curso 2019/2020 en el que no solo adquirí nuevos conocimientos y formas de trabajar en un ambiente más multicultural del que estoy acostumbrado, sino que también aprendí mucho de mí mismo. Esta actitud y esta experiencia tan positiva que viví me ayudó saber afrontar nuevos retos y proyectos.

Siempre me ha preocupado el medio ambiente y me ha interesado la aplicación de energías renovables a las tecnologías, así cuando debí elegir tema para el proyecto de fin de grado pensé que en su desarrollo debía conjugar estos dos aspectos.

El reto de diseñar una embarcación para el transporte de vehículos y personas con propulsión eléctrica utilizando baterías me pareció un tema apasionante, más teniendo en cuenta, después de consultar diversas fuentes, que las embarcaciones son los últimos medios de transporte en adoptar las energías limpias.

El contacto con la empresa *Transportes Fluviales de Coria, SL* me motivó todavía más ya que podía basar mi estudio en un caso real y utilizar datos proporcionados por empresas que están desarrollando este servicio. El pensar que el proyecto podría llegar a hacerse realidad supuso un plus en la motivación y exigencia de mi trabajo.

Conforme avanzaba en el desarrollo del proyecto surgió también la posibilidad de desarrollar la generación de la energía mediante células fotovoltaicas y así completar la eficiencia ecológica de este estudio.

Según mi opinión la ingeniería debe dar respuesta a los problemas complejos que se plantean en cada momento aportando soluciones tecnológicas basadas en la ciencia y este estudio está impregnado de esta filosofía.

### 1.3.2.2. Motivación industrial

El principal atractivo del proyecto consiste en el diseño de una embarcación eléctrica sin emisiones. Esta embarcación no requiere, por tanto, de carburantes que contaminan la fauna y flora de los ríos, tampoco produce contaminación acústica ya que es una tecnología silenciosa. Además, el mantenimiento de la embarcación es más económico ya que necesita

menos revisiones y las averías son más baratas de reparar y también es más económica su recarga.

Por otro lado, es un proyecto innovador que incorpora tecnología punta y que supone una novedad en el mercado y pretende aprovechar los avances en el desarrollo de las tecnologías eléctricas y los vientos favorables del mercado hacia este tipo de energías limpias.

El tipo de servicio que ofrece la barcaza proporciona innegables ventajas, entre las que podemos destacar las siguientes:

- Transporte de personas, vehículos y/o mercaderías a través de ríos (longitudinal y transversal) sin la necesidad de construir puentes ni excavar túneles.
- No supone una inversión de infraestructura para las Administraciones.
- Genera puestos de trabajo estables.
- Se acaba con la problemática que presentan los puentes respecto a:
  - Polución:
    - Construcción
    - Uso
    - Permanencia
  - Afección a la zona de su flora y fauna
  - Dificulta la navegación

Finalmente, hay que destacar que este proyecto podría convertirse en una realidad ya que se ha desarrollado sobre la situación real de una empresa que realiza la navegación fluvial, la empresa *Transportes fluviales de Coria del Río SL*, sin alterar su filosofía, tal y como la define la empresa en su página web:

#### ***“Uniendo ambos márgenes del Guadalquivir desde 1970***

*La navegación fluvial es una actividad centenaria que ya practicaban nuestros ancestros, mucho tiempo atrás.*

*En nuestra escueta y humilde carta de presentación, debemos señalar que somos una pequeña empresa dedicada al transporte fluvial, tanto de pasajeros como de vehículos, por el largo y ancho del curso del río Guadalquivir.*

*Debemos nuestros orígenes y nuestra antigua iniciativa empresarial, a la fuerte actividad rural, tan presente en nuestra cercana orilla de levante, en el río Guadalquivir, a la altura y en el término municipal de Coria del Río, este nuestro pueblo. Aunque nuestros servicios ofrecen cobertura a muchos vecinos de los diferentes pueblos esparcidos por el curso bajo del Guadalquivir.*

*En esta línea, debido a la cantidad de jornaleros que arribaban a diario al otro lado del río, veríamos nacer nuestra aventura empresarial.*

*Nuestra empresa, Transportes Fluviales Coria, S.L, (aunque tenemos la suerte de haber adquirido con el paso del tiempo, el nombre de nuestro pueblo como apellido, siendo conocida popularmente nuestra empresa como "La Barca de Coria"), comenzó su actividad regular allá por 1970, tras la adquisición de la primera de nuestras barcazas, que tiene el honor de recibir el nombre de la patrona de nuestro municipio, Virgen de la Estrella. Nuestra última adquisición sería en el año 2008. Tratándose esta, de una barcaza de mayores dimensiones que sus dos predecesoras. Recibiría el nombre de Rioquivir, con una capacidad de 120 personas y 20 vehículos, aproximadamente."*



**Figura 1: Barcaza que realiza el transporte en Coria del Río (Fuente: web de Transportes Fluviales de Coria del Río SL)**

### **1.3.3. Requerimientos previos**

Los requerimientos previos para la realización de este trabajo se basan en los conocimientos adquiridos a lo largo del grado en ingeniería en tecnologías industriales, especialmente los relativos a:

- Mecánica de fluidos: todos los aspectos relacionados con las fuerzas y simulación.
- Expresión gráfica: para el diseño del barco.
- Organización y gestión: herramientas en la dirección de trabajo.
- Métodos numéricos: mallado y tipos de elementos de la simulación.
- Cálculo: dimensionamientos, relaciones trigonométricas, funciones.
- Mecánica: cálculo de fuerzas y momentos.

Además, para realizar este proyecto es necesario iniciativa de investigación y capacidad de tomar decisiones.

## 2. Estado del Arte

Antes de empezar con el proyecto se ha realizado una investigación técnica de la oferta actual de barcos eléctricos. Diferenciar por tipos las embarcaciones eléctricas que existen, las prestaciones que ofrecen y la tecnología que tienen implementada han sido puntos de la investigación. Los resultados de este estudio muestran que la oferta de barcos eléctricos en el mercado es escasa, se centra en embarcaciones de pequeño tamaño y principalmente está orientada al ocio.

Dentro de la oferta podemos observar los siguientes segmentos principales en el mercado:

### Embarcaciones neumáticas

Capacidad: 2÷4 personas.

Eslora: 2÷3 m

Baterías: 600Wh

Datos de conducción: velocidad máx. 3÷5 km/h

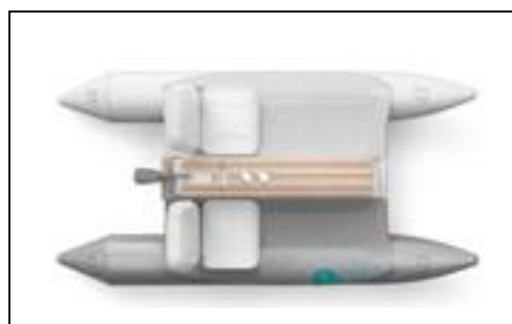


Figura 2: Embarcación neumática (Fuente: NauticExpo)

Son barcos muy ligeros que tienen principalmente una utilidad recreativa, de salvamento o vigilancia. Suelen ser embarcaciones auxiliares, se encuentran en otros barcos de mayor tamaño para ser utilizadas en caso de emergencia. Presentan un motor fueraborda.

### Botes eléctricos

Capacidad: 2÷5 personas máximo

Eslora: 3÷4,5 m

Motor: 650÷1600 W

Baterías: 7.680 Wh

Datos de conducción: velocidad máxima 7 km/ h



Figura 3: Bote eléctrico (Fuente: web de NauticExpo)

Son barcos construidos en madera y fibra de carbono, con una eslora de unos 4,5 metros, para uso normal de dos a cuatro personas, con velocidades bajas y con motor intraborda. Tienen una potencia equivalente a 1,5CV (1,1 kW) a diferencia de los de carburante que tienen una potencia 30CV.

## Barcos open

Capacidad: 10 personas máx.

Eslora: 6÷10 m

Motor: 10 kW

Baterías: 25 kWh

Velocidad crucero: 6 km/ h



Figura 4: Barco open (Fuente: web de NauticExpo)

Son barcos no cubiertos para uso recreativo, la pesca o la caza. Con una capacidad máxima de unas 10 personas adquieren velocidades bajas. Su uso está reservado para lagos y ríos.

## Cabin- cruisers

Capacidad: 8 personas

Eslora: 6÷12 m

Motor: 10 kW + motor diésel

Baterías: 12,5 kWh, 30 kWh y mayor tamaño

Velocidad crucero: 16÷27 km/h

Autonomía: hasta 20 horas



Figura 5: Cabin-cruiser (Fuente: web de NauticExpo)

Son barcos de uso generalmente recreativo para realizar cruceros, para navegar por las costas y vías interiores, con una capacidad máxima de 8/10 personas. Según las preferencias presentan importantes diferencias según modelos y características tanto en las baterías como en la autonomía y velocidad. Se ofertan solo con un sistema de propulsión híbrido que combina la tracción eléctrica con motores diésel.



## Runaboat

Capacidad: 2÷4 personas

Eslora: 4÷8 m

Motor: 110,32 kW

Baterías: 7 kWh÷12,5 kWh

Velocidad máxima: 75 km/h

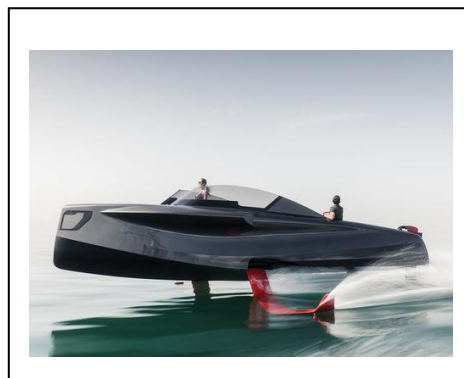


Figura 6: Runaboat (Fuente: web de NauticExpo)

Su finalidad es la de alcanzar grandes velocidades, por contra, tienen una autonomía reducida. Son embarcaciones alargadas con un perfil hidrodinámico que no buscan la comodidad de los pasajeros. La necesidad de adquirir velocidades elevadas implica motores con mucha potencia y baterías de bajo peso con poca capacidad.

## Pontones o barcazas

Capacidad: 8÷10 personas

Eslora: 4÷10 m

Uso: recreativo en costas, ríos y lagos, transporte

Motor: 16 kW

Baterías: 12,5 kWh÷30 kWh



Figura 7: Pontón o barcaza (Fuente: web de NauticExpo)

Este tipo de embarcación que se usa como una plataforma flotante con diferentes aplicaciones como el transporte de mercancías o personas. Principalmente están pensados para el transporte de pasajeros y en muchos casos su objetivo es el ocio. La velocidad que alcanzan estos barcos es reducida.

Después de haber analizado la oferta de embarcaciones eléctricas existente en el mercado, podemos concluir que la aplicación de las tecnologías eléctricas se circunscribe a embarcaciones de pequeño tamaño orientadas principalmente al uso recreativo y que en cuanto las exigencias de los usuarios son mayores se opta por soluciones híbridas. Sorprende la poca adaptación de motores eléctricos a embarcaciones con un uso más comercial o industrial.

### 3. Especificaciones

Como ya se ha mencionado anteriormente el proyecto va a consistir en el diseño de un pontón (o barcaza) eléctrico alimentado por placas solares que realice el servicio que hoy en día realizan los tres pontones de la empresa *Transportes Fluviales Coria, S.L.*

Se desea realizar un producto competitivo. Para ello se ha contactado con la empresa y se han solicitado todos los datos correspondientes al servicio que otorgan. Estos datos han sido aportados gentilmente y se exponen a continuación.

#### 3.1. La flota

La empresa cuenta con tres pontones de carga de vehículos, cada uno de los cuales tiene las siguientes características:

1. 'RIOQUIVIR'
  - a. Motores: dos motores VOLVO PENTA de gasoil y con una potencia de 298 kW.
  - b. Dimensiones: 20 m de eslora máxima, 12 m de manga y un calado máximo de 0,88 m.

Es la embarcación más nueva y de mayor tamaño, tiene un sistema de dos motores que le permite realizar el transporte sin necesidad de girar.

2. 'VIRGEN DE LA ESTRELLA'
  - a. Motor: un solo motor VOLVO PENTA de 149 kW.
  - b. Dimensiones: 15,08 m de eslora máxima, 7,65 m de manga y 1,01 m de puntal.

Antes contaba con un motor de menor tamaño que ha sido substituido.

3. 'MARÍA ISABEL'
  - a. Motor: un solo motor VOLVO PENTA de 149 kW.
  - b. Dimensiones: 14,7 m de eslora, 8,1 m de manga y 1 m de puntal.

Conocer las embarcaciones guiará el proceso de dimensionamiento del barco y servirá como referencia para concluir si los resultados que se obtengan del trabajo son coherentes.

## 3.2. Servicio

Es importante saber el servicio que proporcionan estas barcas a la hora de cruzar el río, para realizar un cálculo de las necesidades de potencia de propulsión y capacidad de carga de las baterías del barco eléctrico.

### 3.2.1. Cruce

Se ha considerado cruce a la acción de la barca de cruzar de un lado a otro del Guadalquivir. En unos de estos lados está situado el embarcadero que posteriormente será utilizado como lugar de carga de las baterías. Las características del cruce que efectúan las barcas son:

- **Tiempo de cruce:** de 1 min a 1,5 min (2 min en condiciones desfavorables).
- **Tiempo entre cruce:** oscila entre los valores de 10 a 15 minutos.
- **Velocidad de bajada del Río:** entre 4,07 km/h y 7,408 km/h.
- **Distancia del cruce ( $d_x$ ):** el cruce tiene una distancia recta de 190 m.

A la hora de realizar el diseño de la barcaza ésta ha de ser capaz de conseguir vencer la velocidad de bajada del río en su valor más elevado, 7,408 km/h. También se ha estipulado que el tiempo entre cruce sea óptimo y se ha dejado el tiempo de cruce como un intervalo permitido entre 1 min y 1,5 min que dependerá de la potencia de los motores escogidos.

### 3.2.2. Fases del cruce

A la hora de analizar el cruce se puede considerar que está dividido en tres fases diferentes en función de la velocidad de la barcaza. Las tres fases son aceleración, velocidad crucero y freno.

#### i. Aceleración

Es la primera fase del cruce y consiste en acelerar la barcaza hasta alcanzar la velocidad crucero y orientar la barcaza en su posición correcta. Durante el tiempo de aceleración los motores se encuentran trabajando a su máxima potencia.

En el proceso de investigación de motores eléctricos para barcos se ha observado que existe una ratio que relaciona la potencia máxima con la potencia nominal. Esta ratio se cumple en la gran mayoría de casos y es:

$$\frac{P_{max}}{P_n} \cong 1,26 \quad (1)$$

Por lo tanto, en la fase de aceleración el motor se encontrará trabajando a una potencia de 1,26 veces su potencia nominal.

Las características de la fase de aceleración son:

- Aceleración positiva y variable.
- La fuerza proporcionada por los motores es máxima y superior a la fuerza de arrastre.
- La fuerza de arrastre varía en función de la velocidad. Su valor mínimo está marcado por la velocidad de bajada del río que no se puede despreciar.

En la figura 8 se muestran las fuerzas que actúan sobre la barca en esta fase:

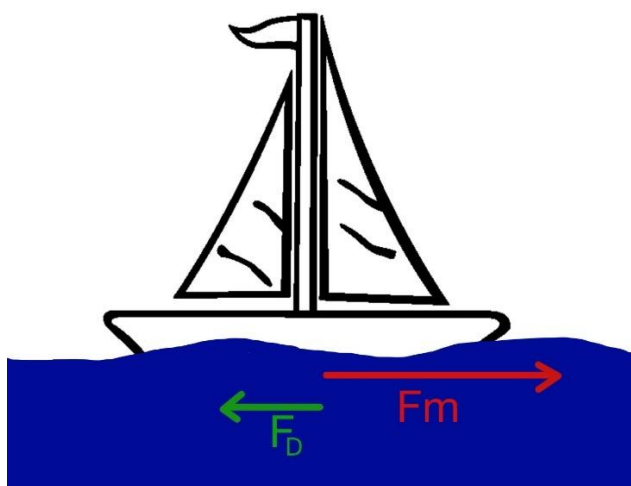


Figura 8: Diagrama de fuerzas en la fase aceleración (Fuente: elaboración propia)

## ii. Velocidad crucero

Es la segunda fase del cruce y la más larga. Los motores trabajan a su potencia nominal y la fuerza de propulsión se iguala con la fuerza de arrastre produciendo una aceleración nula y una velocidad constante llamada velocidad crucero.

Las características de la fase de velocidad crucero son:

- Velocidad constante
- La suma de fuerzas que actúan sobre la barca da una resultante nula.
- La fuerza de arrastre se mantiene constante.

En la figura 9 se muestran las fuerzas que actúan sobre la barca en esta fase:

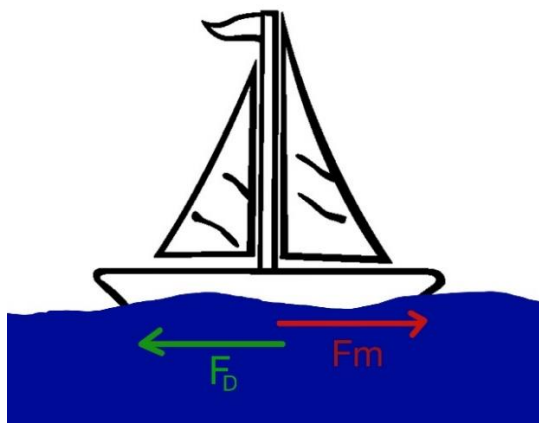


Figura 9: Diagrama de fuerzas de la fase de cruce velocidad crucero (Fuente: elaboración propia)

### iii. Freno

Es la última fase del cruce. Debido a que la fuerza de arrastre por si sola es insuficiente para frenar la barca de manera efectiva se requiere de una fuerza de propulsión contraria al sentido de avance.

Las características de la fase de freno son:

- Aceleración negativa y variable
- La resultante de las fuerzas que actúan sobre la barcaza es de sentido contrario a la velocidad de avance.
- La fuerza de arrastre varía en función de la velocidad. Su valor mínimo está marcado por la velocidad de bajada del río que no se puede despreciar.

En la figura 10 se muestran las fuerzas que actúan sobre la barca en esta fase:

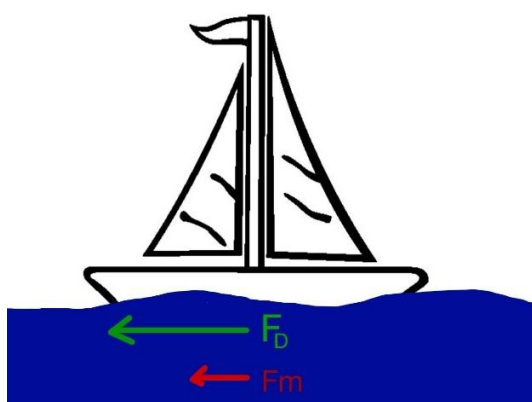


Figura 10: Diagrama de fuerzas de la fase del cruce freno (Fuente: elaboración propia)

### 3.2.3. Viajes diarios

#### 3.2.3.1. Horario de trabajo

El horario de trabajo previsto para la embarcación es de 365 días al año diferenciado en 2 épocas tal como ofrece actualmente la empresa de Coria del Río y expone en su página web.

Los horarios están diferenciados por estaciones:

- Horario de VERANO: de 6:00h a 22:30h.

Un total de 16,5 horas. Corresponde a los meses de primavera y verano (marzo-agosto).  
Un total de 184 días.

- Horario de INVIERNO: de 6:00h a 20:30h.

Un total de 14,5 horas. Corresponde a los meses de otoño e invierno (septiembre-febrero). Un total de 181 días.

#### 3.2.3.2. Número de viajes

Como se ha ido indicando en el proyecto se busca igualar el servicio de Coria. Las embarcaciones de estos salen cada 10 min-15 min.

Con el fin de ofrecer un servicio de calidad se ha decidido que el barco parta cada 10 minutos en verano y 12 en invierno, igualando así la mejor oferta de la mejor embarcación de Coria. La diferencia en el tiempo de partida se debe a dos motivos: menor demanda del servicio en invierno y por la menor capacidad de captación de energía solar durante esta estación.

Para calcular el total de viajes diarios según la estación se ha dividido el tiempo de trabajo entre el tiempo de partida obteniendo el número de viajes diarios para cada época del año:

$$n^{\circ} \text{ de viajes diarios} = \frac{\text{tiempo de trabajo}}{\text{tiempo de partida}} \quad (2)$$

Verano: 98 viajes

Invierno: 72 viajes

#### 3.2.3.3. Paradas en carga

El embarcadero se sitúa en una de las orillas del río Guadalquivir. Es allí donde se encontrará el punto de recarga de las baterías del barco por lo que se debe saber cuántas

veces la barcaza estará estacionada en el embarcadero mientras se encuentra trabajando. Para ello se emplea la fórmula 3.

$$n^{\circ} \text{ paradas} = \frac{n^{\circ} \text{ de viajes diarios}}{2} - 1 \quad (3)$$

Se resta una unidad a la mitad de los viajes porque la última parada no se considera de recarga ya que el barco después queda inmovilizado y toda recarga que pueda tener será ya para el día siguiente.

El número total de paradas según el horario ha sido:

Verano: 48 paradas

Invierno: 35 paradas

### 3.3. Carga del barco

Para realizar el proyecto del diseño conceptual de la barcaza se ha supuesto una carga razonada a partir de los vehículos y/o personas que va a poder llevar.

La mayor parte de los vehículos transportados en el paso de Coria del Río son turismos, aunque al encontrarse en una zona rural también se transportan otro tipo de vehículos destinados a la agricultura como maquinaria agrícola, tractores, remolques, excavadoras...

Aun así, el estudio se ha realizado contando el transporte únicamente de turismos y personas para una situación de carga máxima, contando que todos los viajes realizados por la embarcación cumplen esta premisa. El turismo seleccionado para el estudio ha sido el Peugeot 407 Sw, un coche de grandes dimensiones tal y como se muestra en la imagen 11.



Figura 11: Dimensiones del vehículo Peugeot 407 Sw (Fuente: web de Peugeot)

Para la situación de estudio se ha supuesto, además, que dichos vehículos son transportados a su tara máxima autorizada (2195 kg) y que el barco se encuentra a su máxima capacidad (4 coches). También, se ha fijado que se transportan un número total de 12 hombres los cuales tienen una masa de 75,8 kg que es la media española de masa de un varón. Con los datos anteriores se obtiene que el barco tendrá que cargar por cada viaje:

$$Carga = 12 \cdot 75,8 + 2195 \cdot 4 = 9689,6 \text{ kg} \quad (4)$$



## 4. Viabilidad energética del proyecto

En este apartado se recogen las necesidades energéticas que deberá tener tanto la barcaza como sus componentes. Se ha empezado por el diseño conceptual de la barcaza, con el fin de realizar simulaciones sobre esta y poder ver la fuerza que se requiere de los motores para cumplir con las especificaciones. Para poder realizar la simulación se necesita conocer el volumen sumergido que se obtiene mediante el calado.

### 4.1. Diseño conceptual de la barcaza

El diseño de la embarcación ha sido el primer aspecto atendido a la hora de desarrollar este proyecto y ha ido cambiando a lo largo del trabajo para adaptarse a las necesidades planteadas en cada momento. Este está condicionado por diversos factores:

- **Tipo de vehículos a transportar:** son claves en el diseño. Marcan la forma del barco, que ha de ser accesible para ellos, sus dimensiones repercuten a la vez en las dimensiones de la barcaza y se ha de contemplar su peso al hacer cualquier tipo de cálculo.
- **Solicitaciones del trayecto:** se trata de un trayecto corto el cual no requiere una alta velocidad con lo que no se prioriza un perfil hidrodinámico. La posible cercanía al suelo también impide que se sumerja en exceso y la necesidad de aproximación a las orillas por la popa hace que estas tengan un perfil inclinado.
- **Propulsión de la barca:** la necesidad de movilidad en los dos sentidos implica una solución en el sistema de giro de la propulsión. Para girar o vencer las fuerzas externas laterales se ha de decidir una distribución correcta de los motores.
- **Pilotaje de la barcaza:** la cabina del piloto ha de permitir la visualización del tramo en ambos sentidos.

#### 4.1.1. Dimensiones del casco

A la hora de decidir las dimensiones se ha tenido en cuenta el servicio actual que proporcionan las barcasas de *Transportes Fluviales Coria, S.L.* con el fin de suplir el servicio ya existente. Además, las limitaciones tecnológicas actuales del motor eléctrico implican la imposibilidad de diseñar barcasas de grandes dimensiones si se quiere un rendimiento eficiente.

La forma del barco es de plataforma flotante con una superficie útil es de 84m<sup>2</sup> de eslora máxima de 12 m y una manga de 7 m. Con un puntal de 1 m la parte inferior en contacto con el agua también tiene forma rectangular de 9 m de largo con la misma manga de 7 m.

Los laterales tienen una inclinación en popa de  $25^{\circ}$  que permite la aproximación a la orilla sin dañar el casco.

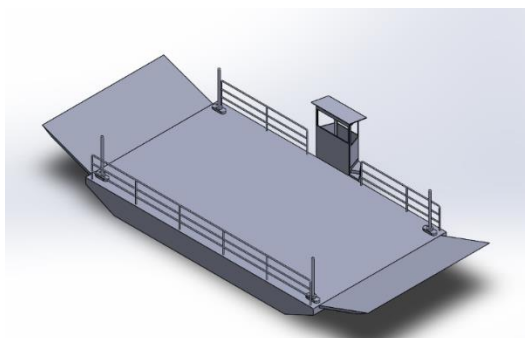


Figura 12: Diseño conceptual de la embarcación (Fuente: elaboración propia)

El tamaño de la embarcación permite transportar 4 turismos correspondiéndole a cada uno un espacio de 5,8 m de largo por 3 m de ancho. Se ha dejado una franja de 1 m de ancho a lo largo del barco para el transporte de otros vehículos de menor tamaño (bicicletas, motocicletas, ...) y/o de personas. Además, esto permite el embarco de vehículos y maquinaria de mayor tamaño que el turismo (furgonetas, camiones, tractores, remolques, ...). Por último, se ha añadido la cabina del capitán en la zona centro.

Para el diseño detallado de la embarcación ver Anexo 1

#### 4.1.2. Sistema de propulsión

La necesidad del barco de cargar y descargar en diferentes orillas presenta la problemática del sistema de propulsión, ya que, si se opta por una propulsión unidireccional obligaría al barco a hacer una maniobra de  $180^{\circ}$  aumentando la dificultad y el tiempo de viaje. También, los vehículos estarían obligados a salir del barco marcha atrás.

Como solución se ha optado por instalar un sistema Z-drive azimuth que posibilita un giro de las hélices de  $360^{\circ}$  permitiendo así el control en ambos sentidos de la barcaza.

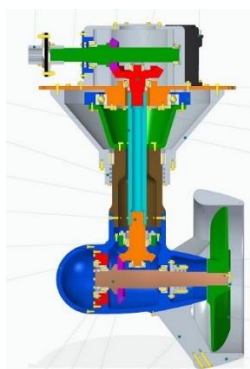


Figura 13: Croquis interno del sistema Z-drive (Fuente: web de Grabcad)

El sistema recibe la sigla “Z” debido a que tiene dos transmisiones que forman un ángulo recto tal y como se puede apreciar en la figura. Con el timón se tiene un control sobre el mecanismo inferior y el sistema permite la transmisión del motor para cualquier posición. Esto evita el timón convencional mejorando su eficiencia y dotando de un mayor ángulo de giro al barco.

Los motores se han decidido colocar en diagonal alejados del eje transversalmente para evitar la interacción entre el flujo de agua que desplazan. También se han colocado lo más lejos posible del centro en posición longitudinal, salvaguardando la integridad del sistema cuando se acerca a la orilla, ya que a mayor distancia se obtiene un mayor momento de giro con una fuerza inferior para controlar mejor el barco.

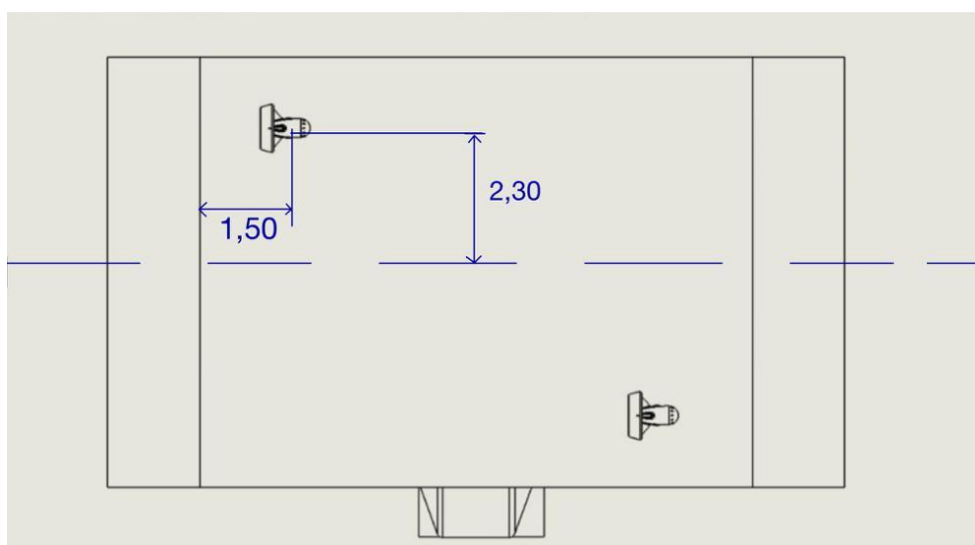


Figura 14: Disposición de los motores (Fuente: elaboración propia)

#### 4.1.3. Otros elementos estructurales

El barco precisa de diferentes elementos estructurales:

- **Cabina:** Está situada en un lateral de la embarcación con una visión por encima de los 2 metros. Se accede de forma lateral y tiene unas dimensiones de 0,8 m de ancho por 2,3 m de alto. Permite una visión de 360° y el control está orientado hacia la barca.
- **Vallas:** Están situadas a lo largo del lateral con una altura de 1,1 m como estipula la normativa.
- **Barreras:** En la popa y en la proa de la embarcación para permitir el embarque y desembarque. Se izan durante la navegación y bajan cuando llegan a las orillas. Miden 2,75 m de largo.

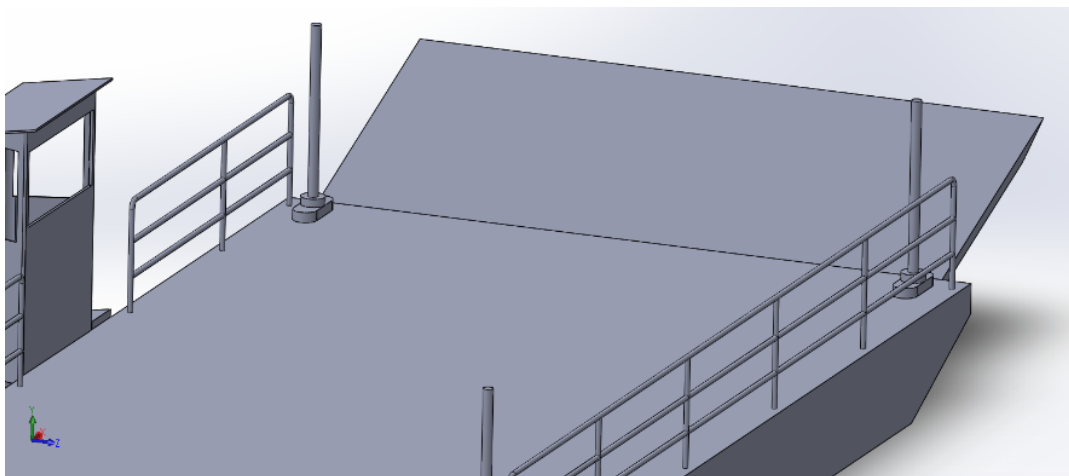


Figura 15: Elementos estructurales del barco (Fuente: elaboración propia)

#### 4.1.4. Elaboración del diseño

Para diseñar el barco se ha utilizado el programa SOLIDWORKS un software con licencia de la UPC que permite elaborar estructuras de cualquier tipo.

La construcción ha empezado por el casco añadiendo después los elementos estructurales. El sistema de giro se ha obtenido a través de la web GRABCAD donde los usuarios comparten diseños de manera gratuita. Para juntar los diferentes elementos se ha realizado un ensamblaje.

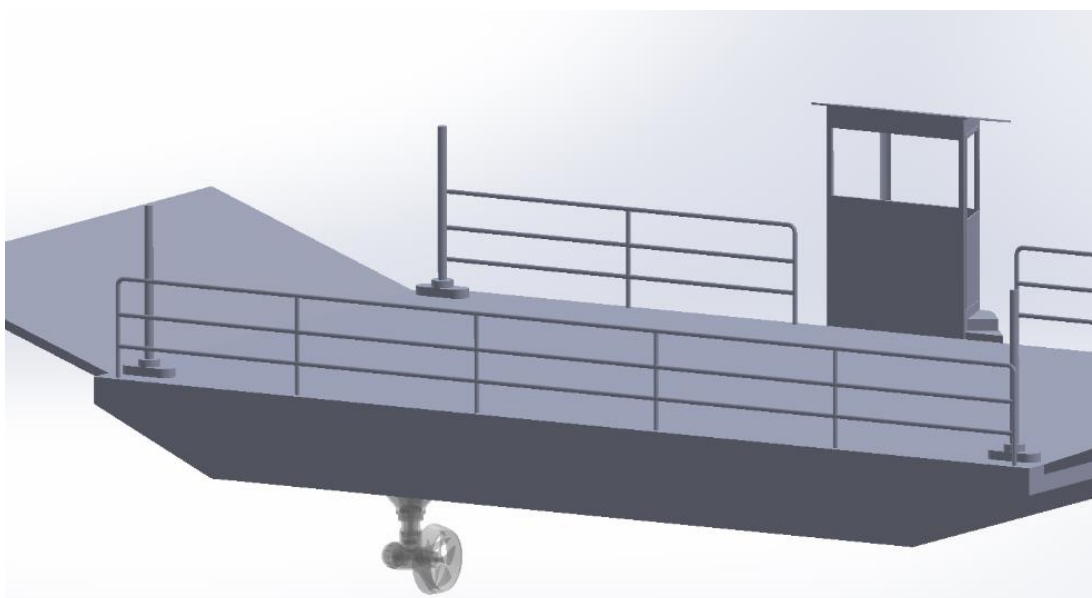


Figura 16: Diseño final de la embarcación (Fuente: elaboración propia)

## 4.2. Cálculos del trayecto

Con el diseño del barco ya fijado ha sido necesario calcular la fuerza externa que va a ser necesaria vencer por los motores para mover la barcaza a ciertas velocidades. Como el fin del proyecto es el de conseguir sustituir el servicio ya existente que ofrecen las barcasas de Coria del Río, se suponen las condiciones de las especificaciones como se ha comentado en el punto 3 y la carga que el barco va a llevar:

- Tiempo de cruce: 1÷1,5 min.
- Velocidad de bajada/subida del río: 7,408 km/h.
- Tiempo entre cruce: 10 min verano, 12 min invierno.

También ha sido necesario suponer una carga de transporte.

### 4.2.1. Peso del barco

A la carga transportada por el barco, ya estudiada en el punto 3.3, se debe añadir el su propio peso.

Para conseguir el peso en vacío de la embarcación no se ha dispuesto de una estructura real ya que no se ha optado por diseñarla. Sin embargo, con el fin de obtener una masa acertada y precisa se ha recurrido a comparar con otras embarcaciones ya existentes.



Figura 17: Gabarra de transporte (Fuente: web de NauticExpo)

A través de la página [nauticexpo.es](http://nauticexpo.es), referente en el sector náutico, se ha encontrado una gabarra de forma similar al casco de nuestra barcaza tal y como se muestra a continuación

en la Figura 17. El peso de dicha gabarra es de 80 toneladas de quilos, y a través de una relación de volúmenes se obtiene el peso aproximado del casco de la barca.

$$Masa\ Casco = Masa\ gabarra \cdot \frac{Volumen\ barcaza}{Volumen\ gabarra} = 80.000\ kg \cdot \frac{12m \cdot 7m \cdot 1m}{20m \cdot 9m \cdot 1,7m} = 22.000\ kg \quad (3)$$

Además, se ha supuesto una masa de 2.000 kg de componentes donde se incluyen las barandillas, cabina, baterías, motores, iluminación y barreras.

$$Masa\ barcaza\ en\ vacío = 22.000\ kg + 2.000\ kg = 24.000\ kg \quad (5)$$

Se ha considerado entonces que la barcaza tiene una masa máxima de:

$$24.000\ kg + 9.698\ kg = 33.698\ kg \quad (6)$$

El estudio implicará que pueda transportar en cada viaje 33.700 kg de masa, es decir, un peso de 330,6 kN.

#### 4.2.2. Calado de la barcaza

Se considera calado de un bote a la longitud máxima del casco que se encuentra sumergida en el agua.

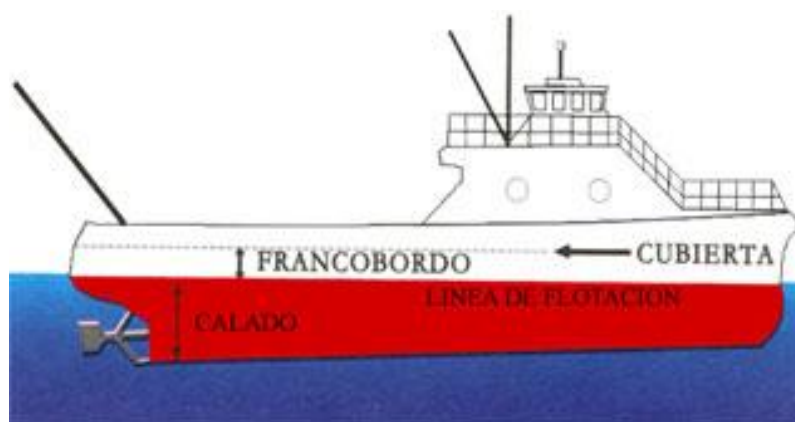


Figura 18: Partes de un barco (Fuente: web de Ingeniero Marino)

##### 4.2.2.1. Principio de Arquímedes

El volumen sumergido de un barco se calcula aplicando el principio de Arquímedes que afirma: “Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desalojado por el cuerpo”

Con la fórmula del empuje de:

$$E\ (N) = \rho_{líquido} \cdot g \cdot V_{sumergido} \quad (7)$$

#### 4.2.2.2. Volumen sumergido

El volumen de la barcaza hundido se obtiene desglosando el casco del barco. Se puede interpretar como la unión de 3 partes (una rectangular y dos prismáticas de base triangular e iguales) más el volumen de los sistemas Z-drive.

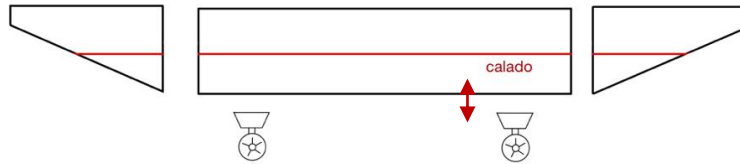


Figura 19: Volumen sumergido segmentado por geometrías (Fuente: elaboración propia)

Igualmente, el  $V_{\text{Sumergido}}$  depende del calado,  $c$ , ya que en la segmentación del buque se obtiene el volumen de la siguiente relación:

$$V_{\text{sumergido\_casco}}(c) = 9 \cdot 7 \cdot c + 2 \cdot \frac{c}{\tan(25^\circ)} \cdot c \cdot 7 \quad (8)$$

El volumen de las hélices se obtiene mediante SOLIDWORKS y es de 0,08 m<sup>3</sup> cada uno.

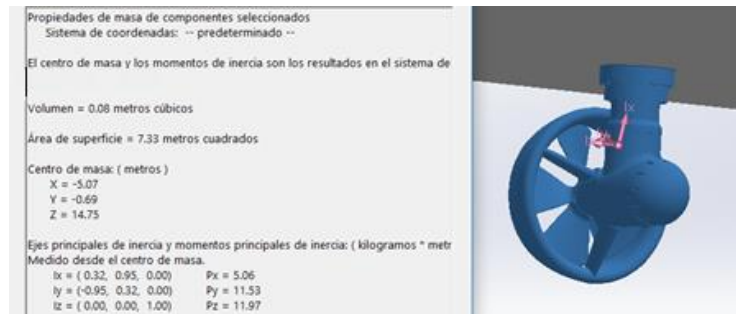


Figura 20: Volumen sumergido de un sistema Z-drive (Fuente: elaboración propia)

El volumen sumergido total es pues:

$$V_{\text{sumergido}} = V_{\text{sumergido\_casco}}(c) + 2 \cdot V_{\text{sumergido\_z-drive}} \quad (9)$$

#### 4.2.2.3. Cálculo del calado

La embarcación presenta una geometría simétrica y con una altura constante a lo largo de ella (calado constante). Se consigue pues, la longitud del calado igualando el peso de la barca con el empuje del agua.

Relacionando (6) con (7) y (9) y marcando una densidad del agua  $\rho = 998,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y una constante gravitacional de  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  se obtiene un  $V_{\text{Sumergido}} = 33,75 \text{ m}^3$  con un calado de  $c = 0,47 \text{ m}$ .

### 4.2.3. Estudio de fuerzas

Una vez se ha obtenido la longitud del calado se ha procedido calcular las fuerzas que actúan sobre el barco cuando este está en movimiento.

#### 4.2.3.1. Fuerza de drag

La fuerza de drag o arrastre se produce cuando un fluido se encuentra en contacto con un sólido (y entre ambos existe una velocidad relativa) en dirección y sentido del flujo. Este fenómeno se debe principalmente a la propiedad física de la viscosidad que presentan los fluidos reales. Esto genera dos fenómenos que se oponen al movimiento del sólido: una diferencia de presiones entre la parte delantera del sólido (mayor presión) con la parte trasera (menor presión) debido a la velocidad del fluido y un coeficiente de fricción entre el sólido y el fluido. También, se genera en el contorno que rodea al sólido una capa con un perfil de velocidades en dirección perpendicular al sentido del flujo y la superficie conocida como 'capa límite'. Su ecuación es:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_{\text{mojada}} \cdot v_{fs}^2 \quad (10)$$

$C_D$ : coeficiente de drag. Es característico de cada geometría, la manera de calcularlo es mediante la simulación o experimentación con modelos a escala.

$A_{\text{mojada}}$ : área mojada. Depende de si la fuerza de drag es debida mayormente a la fricción entre el fluido y el sólido o a la diferencia de presiones que se genera entre la punta y la cola del objeto. Para el caso de estudio, donde la fuerza principalmente es debida a las presiones, se ha utilizado el área correspondiente a la proyección de la barcaza en dirección del flujo.

$v_{fs}$ : velocidad relativa del fluido respecto el sólido en m/s.

#### 4.2.3.2. Simulación en ANSYS

Para calcular la fuerza de arrastre del diseño conceptual de la embarcación (9) se ha obtenido el coeficiente de fricción,  $C_D$ , mediante la simulación con el programa ANSYS. No se ha contado con el programa completo si no con una licencia para estudiantes que limita sus funciones y accesorios. Trabajar con un programa limitado ha generado problemas en la simulación que ha obligado a tomar medidas para solventarlos durante el proceso.



El estudio realizado en ANSYS, así como el procedimiento y la valoración de validez de los resultados que se ha seguido se puede consultar en el [Anexo 2](#).

La conclusión de este análisis es que la embarcación tiene un coeficiente de drag:

$$C_D = 0,39168736$$

#### 4.2.4. Mejora hidrodinámica de la geometría.

Con el proceso de simulación completado se ha decidido alterar la geometría original de la barcaza con el propósito de mejorar la capacidad hidrodinámica. Se ha respetado que la barcaza sea simétrica, ya que ha de avanzar en ambos sentidos de la marcha. También se ha tenido en cuenta que cualquier alteración del volumen afecta al calado.

Para conseguir reducir el coeficiente de drag se han redondeado las esquinas acabadas en punta que presentaba el casco de la barcaza. Las esquinas que son un obstáculo al paso del agua y generan una concentración de altas presiones en la parte delantera del barco donde el agua queda atrapada provocando un aumento del coeficiente de drag.

Las puntas han sustituidas por perfiles circulares de radio 0,1 m que favorecen la circulación del flujo de agua a través del volumen sumergido y evitan los puntos de concentraciones de presiones.

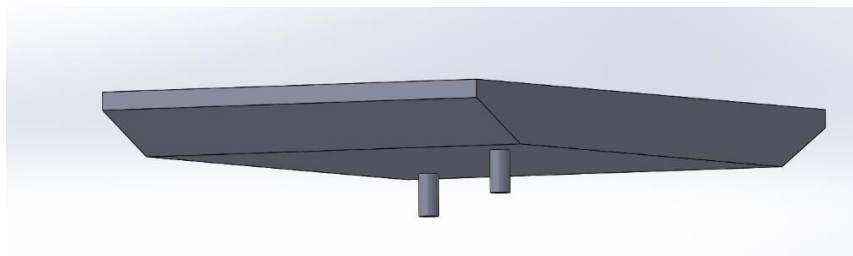


Figura 21: Casco antes de las modificaciones (Fuente: elaboración propia)

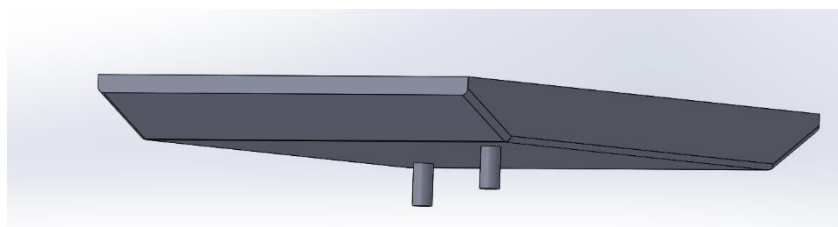


Figura 22: Casco posterior a las mejoras hidrodinámicas (Fuente: elaboración propia)

Las modificaciones solo han sido realizadas sobre el casco que se encuentra sumergido. La variación de volumen respecto al modelo inicial ha sido de 0,06 m<sup>3</sup> una diferencia que no altera la longitud del calado.

Para calcular las fuerzas externas que actuarán sobre la nueva geometría se ha repetido el proceso de simulación en ANSYS desde el punto **4.2.3.2** (ver en el Anexo 3).

Los resultados obtenidos se han considerado válidos y han sido utilizados para el desarrollo del proyecto. El nuevo valor del  $C_D$  obtenido ha sido:

$$C_D = 0,37356186$$

### 4.3. Cálculo de necesidad de propulsión

El fin del proyecto es el de sustituir el servicio que ofrece la empresa *Transportes Fluviales Coria, S.L.* con barcasas diésel por embarcaciones eléctricas. Para que esta sustitución sea equiparable las nuevas barcasas eléctricas deben ser capaces de ofrecer el mismo servicio. Los cálculos de potencia necesaria que deben tener los motores para vencer la fuerza de arrastre se han realizado teniendo en cuenta los parámetros indicados en el punto **4.2**.

Otros parámetros que se han tenido en cuenta han sido la velocidad de bajada del río y el tiempo de cruce. Se ha aplicado la velocidad de bajada más restrictiva  $v_b = 5$  nudos = 7,408 km/h y se ha flexibilizado el tiempo de cruce del río aceptando tiempos entre 1 min y 1' 30".

La forma de estudiar la viabilidad energética de los motores eléctricos que requiere la embarcación ha sido comprobar que la barcaza es capaz de efectuar el servicio dentro del intervalo de tiempo exigido. El método de comprobación ha consistido en una selección previa de motores para después demostrar con un estudio individual que son capaces de proporcionar la potencia necesaria para que la embarcación cumpla con los requisitos de tiempo de cruce sin entrar en detalles de propulsión de la hélice o de relación de propulsión.

#### 4.3.1. Selección del motor

El criterio de selección de los motores eléctricos se basa en:

- Las características de los motores de las embarcaciones, proporcionadas por la empresa de Coria del Río, que han orientado la cuantificación de la potencia necesaria de los motores eléctricos. En concreto la potencia de las dos embarcaciones de menor tamaño.
- En la oferta actual de motores eléctricos para barcos.

La escasa oferta de productos eléctricos para el sector náutico, que siempre se encuentra a la cola en innovación, ha resultado un problema a la hora de encontrar diversidad de soluciones. Se ha optado por emplear productos de la empresa *Torqueedo* la cual ofrece soluciones completas de sistemas de propulsión eléctrica y control, asegurando la compatibilidad entre los componentes.



Figura 23: Motor deep blue 50i (Fuente: Torqueedo)

El motor elegido ha sido el Deep blue 50i de 1400 rpm. Es un motor que trabaja a una potencia nominal de 40 kW, pensado para barcos pesados que no adquieren una alta velocidad. La potencia máxima efectiva de los motores de la embarcación será pues de 100 kW.

#### 4.3.2. Estudio de la viabilidad del motor

Este apartado ha de responder a la pregunta de si los motores seleccionados son capaces de proporcionar la potencia suficiente para cubrir las tres fases del cruce especificadas en el apartado 3.2.2 en el intervalo de tiempo requerido.

##### 4.3.2.1. Estudio de la distancia a recorrer:

La distancia que separa los dos muelles en línea recta es de 190 m ( $d_x$ ), pero la distancia que debe recorrer la barcaza es superior porque durante todo el tiempo de cruce debe compensar el arrastre del río. La distancia recorrida debida a la velocidad del río,  $d_r$ , es perpendicular a  $d_x$  haciendo que la distancia total,  $d_t$ , se calcule como la hipotenusa del triángulo rectángulo que forman ambas distancias como se explica en la figura 24.

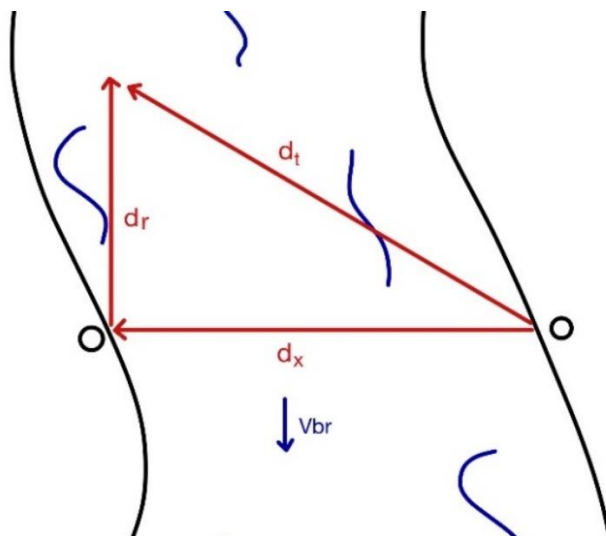


Figura 24: Distancias representadas sobre el río (fuente: elaboración propia)

$$d_t(t) = \sqrt{d_r(t)^2 + d_x^2} \quad (11)$$

El cálculo de  $d_r(t)$  está influenciado por la velocidad de bajada del río,  $v_{br}$ , y el tiempo de cruce:

$$d_r(m) = v_{br}(m/s) \cdot t_c(s) \quad (12)$$

Se ha descompuesto el trayecto en dos ejes, siendo  $X'$  el que une los dos embarcaderos y  $Z'$  el eje contrario a la dirección de bajada del río, suponiendo que forman un ángulo recto tal y como se muestra en la figura 25:

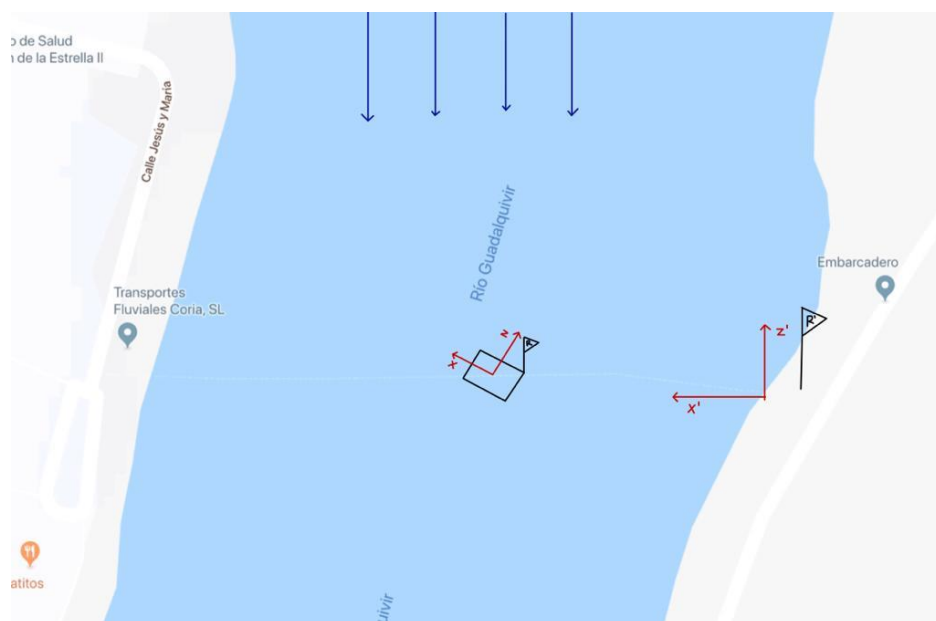


Figura 25: El trayecto y las dos referencias (Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la figura 25 el eje X de la barcaza no coincide con el eje X' de la referencia embarcadero, pues, la barcaza vira hasta encarar el flujo del agua para que fluya en la misma dirección que la estudiada en la simulación (correspondiente a -X). Es necesario virar por la existencia de dos velocidades en los ejes X' y Z' que generan una resultante inclinada respecto a estos. Si la barcaza no virase el flujo incidiría desde otra dirección y cambiarían las fuerzas de resistencia. El ángulo de inclinación se ha representado con el símbolo,  $\alpha$ .

La velocidad que tendrá que alcanzar la barcaza estará compuesta de dos componentes en referencia suelo,  $v_x$  y  $v_z$ , mientras que en referencia a los ejes de la embarcación tan solo tendrá una componente  $v_x$ .

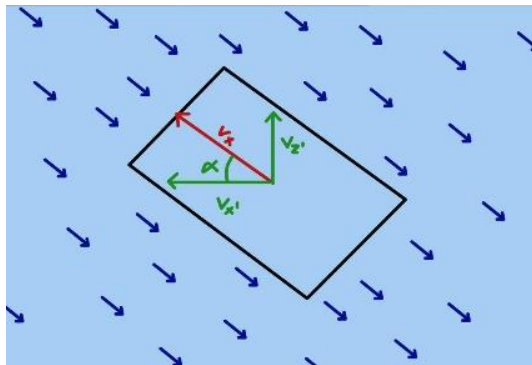


Figura 26: Descomposición del vector velocidad de la barcaza (Fuente: elaboración propia)

#### 4.3.2.2. Fuerza de propulsión

Previo al estudio de las tres fases que componen el cruce se debe calcular la fuerza que es capaz de realizar el sistema de propulsión a partir de la potencia generada por los motores. El método de cálculo de esta fuerza asume las siguientes premisas:

- Rendimiento de los componentes eléctricos (batería + motor) constante,  $\eta_{ce} = 0,84$
- Rendimiento de las hélices constante,  $\eta_{z-drive} = 0,57$
- La velocidad del flujo de agua es siempre en la dirección -X de la barcaza

Todos los factores han sido considerados constantes ya que empíricamente el rendimiento del motor eléctrico varía muy poco en su rango de potencias y a que el estudio de las hélices queda fuera del alcance del trabajo. Ambos rendimientos están explicados en el punto 5.1.

Para una potencia conocida en los motores la fuerza correspondiente de propulsión se obtiene de la siguiente manera:

- 1- Cálculo de la velocidad constante para esa potencia.

$$v_{constante\_Pc} = \sqrt[3]{\frac{P_c \cdot \eta_{z-drive}}{\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{agua} \cdot A_{mojada}}} \quad (13)$$

2- Cálculo de la fuerza de arrastre correspondiente a esa velocidad.

$$F_{Pc} = \frac{P_c \cdot \eta_{z-drive}}{v_{constante\_Pc}} \quad (14)$$

#### 4.3.2.3. Las tres fases del cruce

Para comprobar que los motores son óptimos para este proyecto han de ser capaces de ejecutar las tres fases de forma eficaz. Para este estudio se ha realizado una iteración de la situación del barco (potencia consumida, velocidad, aceleración, fuerza de propulsión, fuerza de arrastre, fuerza resultante, Espacio) en intervalos de 0,1 s.

Todas las magnitudes dependen de la potencia que otorgan los motores sobre su eje en un momento dado,  $P_m(t)$ , y esta potencia es controlada desde el cuadro de mando de la embarcación. Con las siguientes fórmulas se relaciona la potencia de los motores con las magnitudes del estudio:

Fuerza de propulsión, $F_P$ (N)	$F_P(t) = \frac{P_m(t) \cdot \eta_{z-drive}}{v_{constante\_Pm}}$
Fuerza de arrastre, $F_D$ (N)	$F_D(t) = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_{mojada} \cdot v_b(t)^2$
Fuerza Resultante, $F_R$ (N)	$F_R(t) = F_P(t) - F_D(t)$
Aceleración barcaza, $a_b$ ( $m \cdot s^{-2}$ )	$a(t) = \frac{F_R(t)}{m_b}$
Velocidad de la barcaza, $v_b$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$v_b(t+1) = v_b(t) + a(t) \cdot \Delta t$

Tabla 1: Magnitudes del estudio del cruce de la barca (Fuente: elaboración propia)

#### Aceleración

En esta fase se exige a los motores que funcionen a su máxima potencia (100 kW). Llegar a esta potencia requiere un cambio gradual y se ha considerado que se tarda 5 s en ser alcanzada. Durante estos cinco segundos la potencia tendrá un gradiente de:

$$\frac{P_{max}}{\text{tiempo de aceleración}} = \frac{100 \text{ kW}}{5s} = 19,76 \text{ kW/s} \quad (15)$$

Este gradiente, considerado lineal, se ha tenido en cuenta en todo momento del estudio tanto para la aceleración como para el freno.

En el inicio de esta fase la velocidad de la barca en referencia suelo es nula ( $v_b=0$  km/h), pero en la referencia barcaza la barca ya está bajo los efectos de arrastre del flujo del río ( $v_b= 7,4$  km/h). Esto implica que cuando el barco se desata del embarcadero ya está recibiendo la fuerza del flujo del agua correspondiente a la bajada del río. En la siguiente tabla se recoge la situación de la embarcación para el instante  $t =0$  s con los que se ha empezado la iteración.

t (s)	$P_m$ (W)	$v_b$ (km/h)	$a_b$ (m·s <sup>-2</sup> )	$F_p$ (N)	$F_D$ (N)	$F_R$ (N)	d (m)
0	0	7,408	-0,08	0	2.593	-2.593	0

Tabla 2: Valores iniciales de la iteración del cruce (Fuente: elaboración propia)

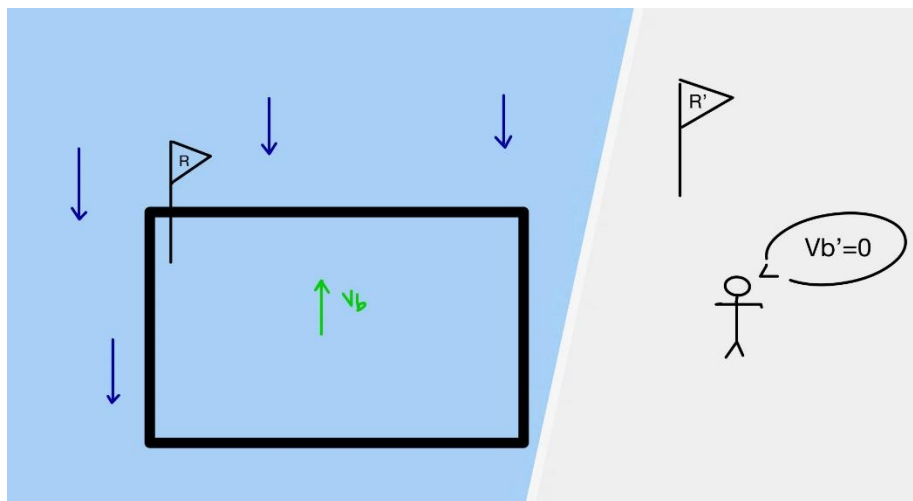


Figura 27: Situación inicial de la aceleración (Fuente: elaboración propia)

Esta fase concluye cuando la barcaza llega a la velocidad crucero (velocidad constante nominal), dura 16,4 s y durante este tiempo se recorren 52 m.

### Velocidad Crucero

Empieza cuando la barca ha conseguido llegar a la velocidad crucero. El valor de la velocidad crucero, calculado a partir de la fórmula (13), es de 15,13 km/h. Durante este periodo la fuerza que han de vencer los motores es constante e igual a la fuerza de arrastre.

$$F_D = F_p = 10.845 \text{ N}$$

Durante toda esta fase el motor estará trabajando a su potencia nominal (80 kW). Esta fase dura 31,8 s y se recorren 135 m.

### Freno

La eficiencia del freno consiste en decidir el momento adecuado de iniciar el frenado con la intensidad correcta para conseguir llegar al lugar deseado con una velocidad.

En el caso de la embarcación se ha tanteado tanto el momento de frenado como la potencia usada buscando optimizar el proceso, es decir, que alcance la distancia total del cruce ( $d_t$ ) con una velocidad nula. En esta fase, se entiende por velocidad nula a  $v_b = 0$  km/h ya que la barcaza ha de seguir venciendo la fuerza del río para no ser arrastrada por él  $v_b = 7,408$  km/h, ver Figura 27. Para conseguir efectuar el frenado las variables son:

Inicio del frenado: 187 m

Potencias del frenado: 0 kW. No se ha requerido de una potencia de freno complementaria por parte de los motores.

El tiempo total de frenado es de 16,8 s y se recorren 48 m.

#### 4.3.2.4. Comportamiento de la barcaza en el tiempo de cruce

Una vez estudiado el comportamiento de los motores eléctricos en las diferentes fases se ha procedido a analizar si los motores del barco son capaces de realizar el servicio en las condiciones óptimas. El tiempo que el barco necesita para cruzar el río es la suma de los tiempos de las tres fases y tiene un valor de 1' 5". La distancia que debería haber recorrido en ese tiempo es  $d_x = 232$  m, ver fórmula 11.

La distancia recorrida es de 235 m y como el tiempo de cruce se encuentra dentro del intervalo de valores aceptados [1', 1' 30"] se puede concluir que los motores cumplen con los requisitos energéticos del proyecto.

En los siguientes gráficos se representa la evolución de las diferentes magnitudes en el transcurso del trayecto:

-Velocidad de la barcaza

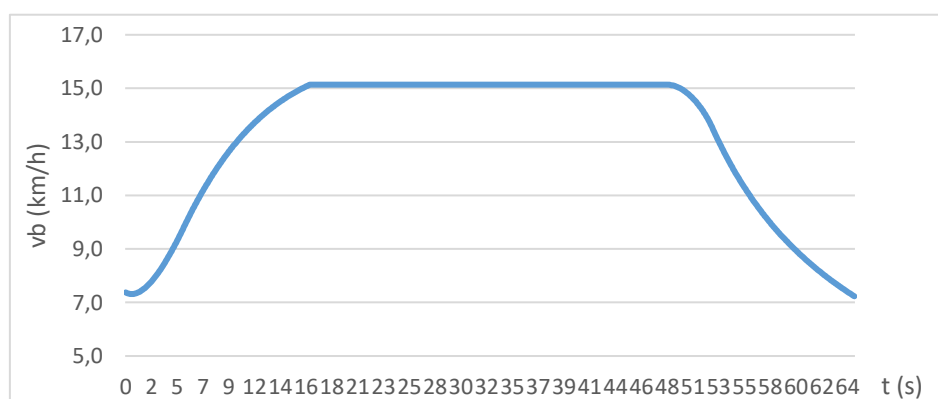


Gráfico 1: Velocidad de la barcaza en función del tiempo (Fuente: elaboración propia)



Se diferencian claramente las tres fases del cruce. La consideración de que la potencia debe seguir un cambio gradual hace que el cambio de fase sea menos brusco y no queden puntas.

-Potencia del motor

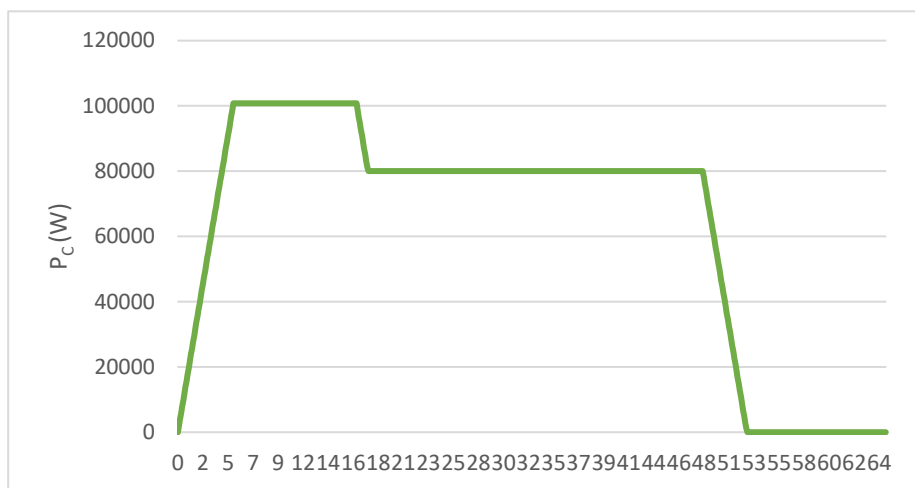


Gráfico 2: Potencia del motor en función del tiempo (Fuente: elaboración propia)

En este gráfico se representa la necesidad de potencia de propulsión requerida de los motores sobre el eje. Esta potencia es controlada por el capitán de la barcaza desde el control de a bordo y la energía que proporcionan los motores es el área que crea la función de la potencia con el eje X.

## 5. Selección de los componentes de la barcaza

### 5.1. Los motores y otros componentes

Es crucial para el correcto funcionamiento de la barcaza una elección de los componentes acorde a las necesidades previamente calculadas.

Como ya se ha explicado en el punto **4.3.1** el motor seleccionado ha sido el Deep blue 50i de 1400rpm de la empresa *Torqueedo*. Se alimenta con corriente continua (CC) y en la oferta incorpora el cableado, una junta homocinética que facilita la instalación, una pantalla táctil de control de a bordo donde se comunica el estado de la carga de las baterías, rpm, autonomía, velocidad, temperatura del motor y las baterías con una interfaz NMEA 2000. Además, viene incluida la unidad de control del motor para medir las funciones de este y gestionar el circuito eléctrico.



Figura 28: Motor Deep blue 50i (Fuente: web de Torqueedo.com)



Figura 29: Unidad de Control del sistema (Fuente: web de Torqueedo.com)

El sistema de control es 'el cerebro' del sistema y donde se producen las conexiones. Cada motor requiere de uno y pueden estar conectados entre ellos. Lleva a cabo la mayor parte de las funciones de control del barco como administrar la potencia procedente de las baterías, regular la potencia entregada al motor y administrar la temperatura de los componentes entre otras. El control de esta unidad se realiza desde el sistema de control de a bordo (pantalla táctil más palanca de velocidades). Como la embarcación cuenta con dos motores se requiere de dos sistemas de control que quedan conectados entre sí con transmisión de datos.

El último componente que incluye la oferta del motor es la palanca de control de velocidades. El control de a bordo es la parte que es controlada por el capitán del barco cuenta con los siguientes elementos:

- Timón: es el instrumento encargado del giro de la propulsión Z-drive. No se encuentra conectado al circuito eléctrico.
- Pantalla de a bordo: punto de información y modificación del sistema eléctrico
- Palanca aceleradora: controla el flujo de potencia que se le otorga a cada motor, debe haber una para cada uno.
- Botón On/off: botón de seguridad para abrir el circuito en caso de peligro
- Llave: contacto necesario para cerrar el circuito eléctrico.

Las baterías escogidas han sido las BMW modelo i3 también ofertadas por la empresa *Torqueedo* que está asociada con el grupo automovilístico alemán BMW. Estas baterías cuentan con una capacidad de 40 kWh y tienen 360V de voltaje. También cuentan con una garantía de nueve años que garantiza que en ese periodo de tiempo mantienen hasta el 80% de su capacidad de carga.



Figura 30: Batería bmw i3 30,5kWh (Fuente: web de Torqeedo.com)

Para la recarga de las baterías se han empleado varios cargadores AC de 10 kW de la marca *Rowercharger* como recomienda el fabricante. El número de cargadores no ha sido especificado en este punto y se ha asignado más adelante, su función es la de convertir la energía que proviene de la red en corriente alterna con un voltaje de 220 V y 50 Hz a 360 V y en corriente continua para que pueda ser captada por las baterías. También se ha contado con la unidad de distribución de energía en tierra de talla L que administra la energía de la red procedente de hasta 3 cargadores a las baterías.

La unidad de carga situada en el embarcadero está compuesta con dos cargadores con un cable tipo 3 que aportan una potencia de carga de hasta 11,2 kW.

El esquema del circuito eléctrico del barco sería el siguiente:

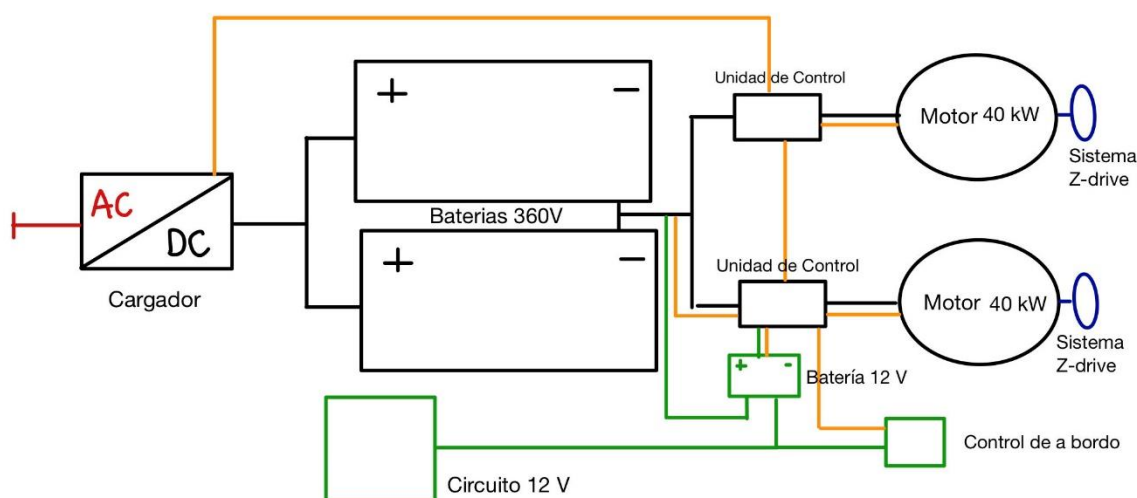


Diagrama 1: Esquema del circuito eléctrico del barco (elaboración propia)

En el diagrama se pueden distinguir diferentes colores, el color rojo corresponde al sistema de 220 V 50 Hz que procede del cargador colocado en el embarcadero y alimenta el cargador interior del barco compuesto por los cargadores AC de 6 kW y la unidad de distribución de energía. El color negro representa el sistema de 360 V, las baterías están conectadas en paralelo. El color azul representa el sistema de transmisión de energía mecánica encargada de la propulsión. El color verde pertenece al sistema de 12 V útil para los accesorios eléctricos del barco y el control de a bordo. Por último, el color naranja es el que indica las conexiones de transferencias de datos.

En la siguiente tabla se recogen datos obtenidos según las indicaciones del fabricante de los componentes que se han empleado para el sistema de propulsión de la embarcación.

Componente	Función	Rendimiento eléctrico	Precio
Deep Blue 25i 1400	motor	0,93	18.000
Caja de conexiones	control	0,98	incluido
BMW i3 battery	batería	0,92	32.000
Z-drive	Sistema de propulsión	0,57	3.000

Tabla 3: Componentes con su respectiva función, rendimiento, potencia nominal de trabajo, precio y cantidad (elaboración propia)

La potencia efectiva de propulsión de la barca cuando el motor trabaja a capacidad nominal es de 45,6 kW. Los rendimientos de los elementos eléctricos del barco hacen que gran parte de la energía eléctrica de alimentación se pierda. Para calcular el rendimiento del sistema de propulsión se emplea la fórmula 16:

$$\eta_{propulsión} = \eta_{batería} \cdot \eta_{caja_c} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{z-drive} = 0,478 \quad (16)$$

El valor de este rendimiento tiene un valor tan bajo debido al sistema Z-drive que está compuesto por dos engranajes cónicos con dientes helicoidales de ángulo recto y una hélice de 4 palas y 0,5 m de diámetro. A pesar de que los engranajes tienen una alta eficiencia de transmisión mecánica (entorno al 93%) la hélice tiene una eficiencia muy baja.

En [el Anexo 4](#) puede verse una tabla con todos los elementos que componen el barco.

## 5.2. Control de la barcaza

Con los motores escogidos se ha realizado un estudio del sistema de control de propulsión para manejar el barco. Los sistemas Z-drive son los encargados de trasladar la potencia del motor a la propulsión mecánica. Permiten un giro de las hélices de 360° posibilitando así el control en cualquier dirección.

Una de las maniobras más importantes que la barca debe ser capaz de realizar es virar, es decir, conseguir girar y así cambiar la dirección de avance. Para ello se ha estudiado la disposición de los motores y las fuerzas que generan en una situación de viraje con velocidad en X:

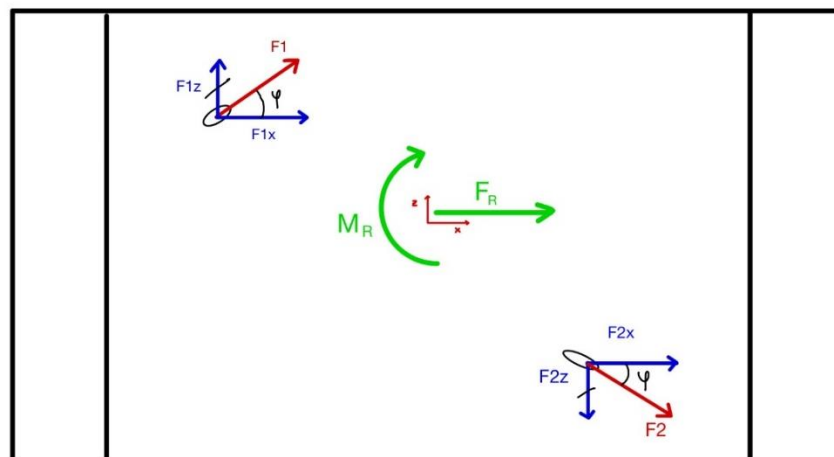


Diagrama 2: Diagrama de fuerzas (elaboración propia)

Como se puede apreciar en la imagen los motores giran el mismo ángulo  $\phi$ , en sentidos opuestos. Si giran en el mismo sentido los momentos que generan se anulan, pero la fuerza

en el eje Z no, creando movimiento en esta dirección. De esta manera, girando en sentido opuesto, las fuerzas en el eje Z se anulan entre sí, pero no el momento resultante como se puede apreciar en la imagen. Su valor es:

$$M_R = |2 \cdot d_x \cdot F_{1z}| \quad (17)$$

Donde  $d_x$  es la distancia al centro de los motores en dirección x, por diseño es de 3 m. El momento generado depende directamente de la distancia al centro en x. Se busca un valor elevado y es un dato que se tuvo en cuenta a la hora de diseñar la barcaza y posicionar los motores, intentando alejarlos máximo posible del centro sin que sufrieran peligro de tocar el suelo a la hora de aproximarse a la orilla. Además, se cumple que  $F_1=F_2$  por lo tanto  $F_{1z}=F_{2z}$  haciendo nula la componente resultante de la fuerza en Z.

La fuerza resultante tiene dirección única en X y su valor es la suma de  $F_{1x}$  y  $F_{2x}$ . El momento que crean las componentes de las fuerzas en X se anulan entre sí haciendo que la distancia al centro en z de los motores sea irrelevante a la hora de maximizar el momento, por contra, en el diseño se ha intentado aumentar la distancia de los motores en dirección Z para evitar que afecten los flujos de agua desplazados por los mismos entre sí.

Se realiza un cálculo de la fuerza requerida por el motor para generar un momento según el ángulo  $\phi$ ,  $\phi$  y teniendo en cuenta que los motores son capaces de generar una fuerza a potencia nominal de 5422,5 N:

Angulo(°)/M(Nm)	3500	6300	8500	10000	144000	240000
15	2253,827	4056,888	5473,58	6439,506	9272,888	15454,81
30	1166,667	2100	2833,333	3333,333	4800	8000
45	824,9579	1484,924	2003,469	2357,023	3394,113	5656,854
60	673,5753	1212,436	1635,826	1924,501	2771,281	4618,802
75	603,9111	1087,04	1466,641	1725,46	2484,663	4141,105
90	583,3333	1050	1416,667	1666,667	2400	4000

Tabla 4: Fuerza que ha de realizar un motor para generar un momento para cierto ángulo (elaboración propia)

En color rojo se muestran los valores que no son alcanzables por los motores. Si los motores se disponen a 90° la barcaza solo gira y no avanza en ninguna dirección ( $F_R=0$ ).

## 6. Cálculos energéticos de la barcaza

Una vez seleccionados los componentes que integrará la barcaza en su sistema de propulsión se ha analizado la energía por viaje que consumirá. Con la energía necesaria para cruzar el río se hará un cálculo de viabilidad de las baterías escogidas.

### 6.1. Energía por cruce.

La energía que se consume por cruce se obtiene del análisis de potencia generada en los motores durante las fases de aceleración, velocidad crucero y freno. La definición de energía es:

$$E = \int P \cdot dt \quad (17)$$

Durante el análisis de las fases se ha controlado la potencia proporcionada por los motores ver gráfico 2. de manera que aplicando (17) a la iteración realizada, se puede calcular la energía generada por los motores de la siguiente manera:

$$E_C = \sum_{i=0}^{650} P_{Ci} \cdot \Delta t = 4,11 \cdot 10^6 J = 1.392,84 Wh \quad (18)$$

Si a este valor se le aplica el rendimiento de los componentes eléctricos de la propulsión,  $\eta_{ce} = 0,84$  (batería+ motor + unidad de control) se obtiene el consumo de energía total por viaje.

$$E_{consumida} = 1.658 Wh/viaje$$

La energía que se consumirá entre paradas será el doble de este valor  $E_{consumida_p} = 3316 Wh/parada$ .

### 6.2. Necesidades energéticas

Debido a la dualidad de horarios de trabajo de las barcazas los cálculos se van a realizar independientemente para cada uno de ellos. Aun así, los cálculos más restrictivos son los del horario de verano ya que trabaja durante un mayor periodo de tiempo y parte con mayor frecuencia que en invierno.

Se ha empezado por distinguir el tiempo que la embarcación se encontrará cargando por cada parada. Con este tiempo se ha calculado la recarga por parada. Con la recarga en las paradas y el gasto en el trayecto se ha calculado el balance de carga de la batería a lo largo del día

### 6.2.1. Tiempo de parada

Para realizar un modelo representativo de la realidad se han marcado las diferentes acciones que forman parte del itinerario del barco con sus respectivos tiempos. Para facilitar la comprensión de los procesos se ha empleado un diagrama de Roy con unidades en minutos:

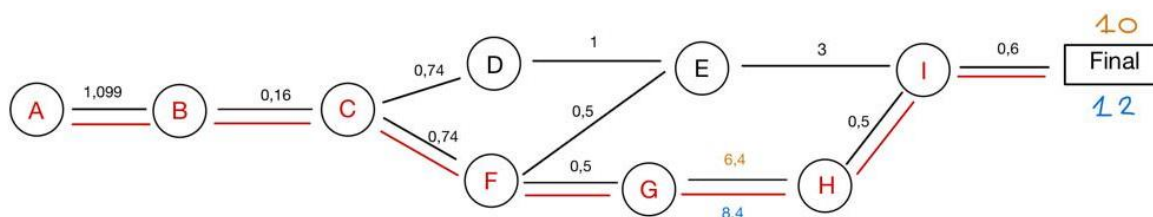


Diagrama 3: Diagrama de Roy de los tiempos de trabajo de un viaje de la embarcación (elaboración propia)

A: tiempo de cruce

B: tiempo que se tarda en amarrar el barco

C: tiempo que se tarda en bajar las compuertas

D: tiempo de desembarco de los vehículos

E: tiempo de cobro de billetes y embarque de los vehículos

F: tiempo de preparación del enchufado

G: tiempo que la embarcación se encuentra enchufada

H: tiempo de desenchufado

I: tiempo de subida de barreras

Que una actividad venga precedida por otra implica que esta no puede ser iniciada hasta que la actividad o las actividades anteriores hayan terminado. El camino marcado de color rojo en el Diagrama 3 corresponde al camino crítico. Con esto se indica que las actividades que se sitúen sobre este camino no admiten flexibilidad en los tiempos y se deben realizar todas en su debido momento. En cambio, el camino únicamente pintado en negro permite cierta flexibilidad en los tiempos de inicio o duración de las actividades. A cada una de las actividades le corresponde un margen de tiempo calculable:



Margen D = 3,4 min en verano/ 5,4 min en invierno

Margen E= 3,4 min en verano/ 5,4 min en invierno

Al ser precedente una de la otra el margen con el que cuentan es compartido, lo que significa que si una actividad consume parte de este margen la otra no optará al tiempo completo de margen si no a la parte restante. Si entre ambas el tiempo supera el margen de 3,4 minutos retrasarán el tiempo total de viaje.

### 6.2.2. Balance de carga

Habiendo obtenido el tiempo que la barcaza estará enchufada cada vez que se encuentre en la orilla de la estación se han realizado los cálculos relativos a la recarga de las baterías.

En la gráfica siguiente se representa el perfil del comportamiento de la carga de las baterías de forma detallada observando las disminuciones de carga en los trayectos y la recarga en las paradas. El balance de estas dos acciones muestra que durante el día el saldo de la carga de la batería disminuye.

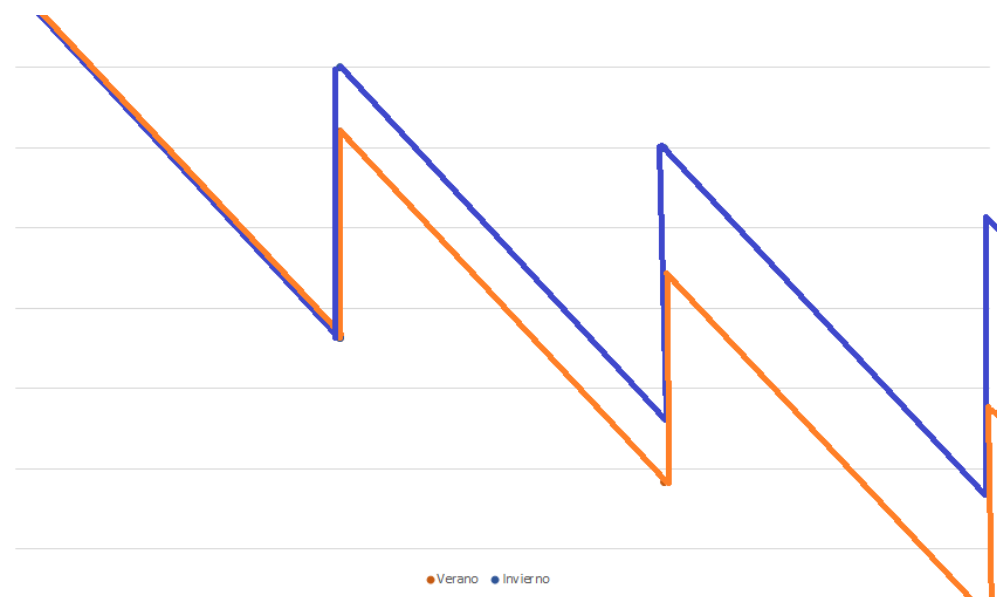


Gráfico 3: Evolución de la carga en las paradas al detalle

En la siguiente tabla se recogen los datos claves para el estudio de la recarga de las baterías en las dos épocas del año. Destacan los datos de la energía total consumida por día y la energía que se recarga por parada.

Horario	VERANO	INVIERNO
Número de viajes	99	72
Paradas en carga	48	35
Energía consumida a lo largo del día (Wh)	166.461	122.298
Capacidad de carga	0,3	0,3
Potencia de recarga (en funcionamiento) (W)	20.000	20.000
Recarga por parada (Wh)	2.133	2.800
Número de paradas mínimas	40,51_ 41	15,14_ 16

Tabla 5: Datos energéticos del trayecto (elaboración propia)

La capacidad de carga es un valor para la prevención del desgaste de las baterías. Está relacionado con la velocidad a la que las baterías se cargan, es decir, al amperaje al que se someten cuando se encuentran enchufadas. De tal manera que como las baterías tienen una capacidad de 61 kWh o 169,44 Ah con una capacidad de carga del 0,3 se deben recargar a 50,83 A.

Del producto de la potencia de carga y el tiempo que la embarcación se encuentra enchufada se ha calculado la energía que el barco recarga por parada. Se observa en la gráfica adjunta a continuación el desarrollo de la energía interna de las baterías evaluada al final de cada parada en función de las paradas que hace.

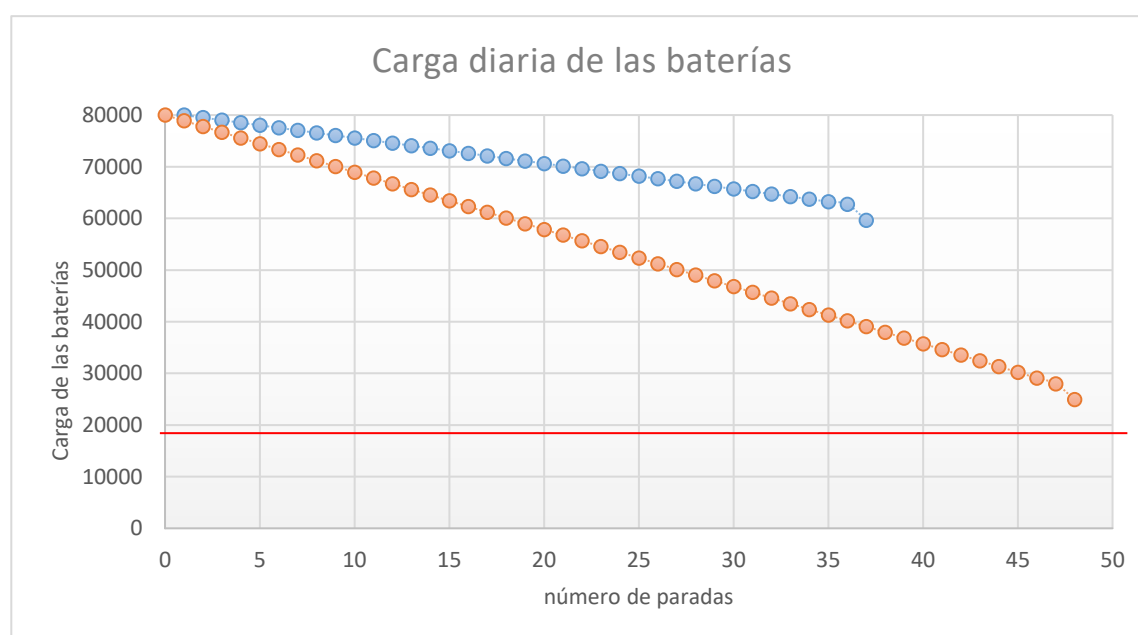


Gráfico 4: Carga diaria de una batería según las paradas en el embarcadero y el horario (elaboración propia)

La gráfica anterior es la resultante de unir los puntos del balance energético de cada parada. En la gráfica se observa que, si se recarga en cada parada, la carga de las baterías queda lejos del límite mínimo (19 kWh) que marca su correcto funcionamiento en ambas estaciones. Este margen ayuda en la labor de los empleados y evita contratiempos en caso de que en alguna parada no se pudiera recargar la embarcación o el tiempo de enchufado fuese inferior al previsto. Además, se observa una diferencia de pendiente entre las rectas que representan la carga de cada estación debido a la diferencia de tiempo que está enchufada.

Se observa que después de cada viaje hay una disminución de la carga de las baterías igual para ambas estaciones que se recupera en parte y de forma diferente, para cada época del año, cuando se llega a la siguiente parada.

Para saber el número de cargas mínimas que se deben realizar se ha empleado la siguiente fórmula:

$$\text{paradas mínimas} = \frac{\text{Energía consumida a lo largo del día(Wh)} - \text{Capacidad de las baterías(Wh)}}{\text{Recarga por parada(Wh)}} \quad (19)$$

El número de paradas mínimas por estación se ha recogido en la tabla 5 redondeando el resultado al alza.

Observando la forma del gráfico 4 destaca que en la última parada se pierda la linealidad debido a que la última recarga no se tiene en cuenta.

Siempre que se cumpla el tiempo de enchufado correspondiente a las paradas mínimas el barco podrá seguir un funcionamiento correctamente a lo largo del tiempo.

Se ha considerado que al final de la jornada laboral, se dejara la barcaza conectada a la zona de recarga. El sistema de control consigue que se desactive el flujo de energía cuando el barco se encuentra totalmente cargado.

Después del estudio de las necesidades energéticas se puede concluir que las baterías seleccionadas son óptimas para garantizar la aportación de energía requerida por la barcaza.

## 7. El proyecto fotovoltaico

Con la conclusión del diseño del barco ha surgido la idea de convertir la embarcación en un vehículo impulsado por una fuente renovable como es el Sol. La decisión ha sido debida a la necesidad de implantar un servicio responsable con el medio ambiente y a las favorables condiciones que ofrece para ello la zona geográfica donde se encuentra.

Esta información ha sido contrastada en la página web [adarse.com](http://adarse.com) que desarrolla un proyecto que busca acercar datos de irradiación solar de diferentes zonas de la península a los usuarios. En el mapa que proporciona esta página se representa de diferentes colores las zonas del territorio español según la energía diaria que incide sobre una superficie horizontal de metro cuadrado. Se observa como Coria del Río, lugar de emplazamiento del proyecto, se encuentra en la zona que recibe una mayor energía solar en la península, con 5,4 kWh/m<sup>2</sup>.

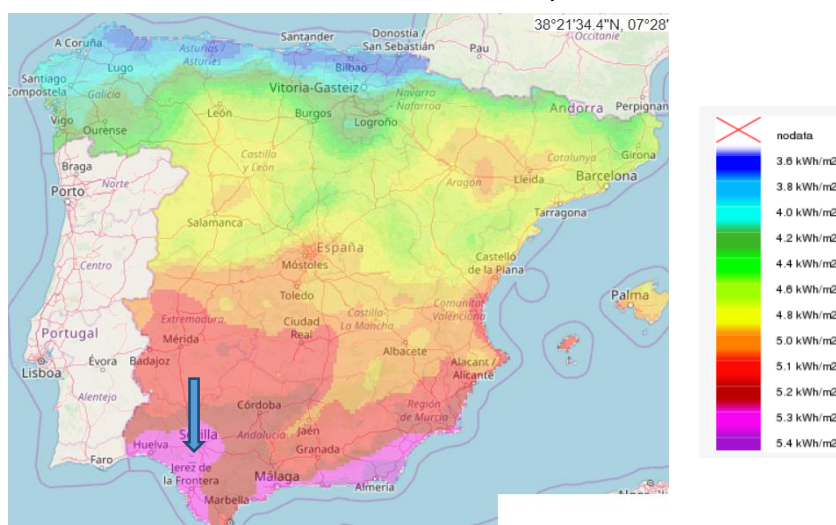


Figura 31: Mapa peninsular de la energía solar según la zona (Fuente: web de Adarse)

### 7.1. Especificaciones

#### 7.1.1. Paneles fotovoltaicos

La manera de captar la energía procedente del Sol es a través de paneles fotovoltaicos que transforman los rayos de luz en electricidad debido a la reacción de sus materiales con los fotones situados entre dos cargas, una negativa de fósforo y otra positiva de boro, funcionando como una pila.

Para elegir unos paneles acordes a las necesidades del proyecto hace falta conocer las características que estos presentan y las prestaciones que ofrecen según las condiciones de trabajo.

### 7.1.1.1. Características generales de los paneles

Las propiedades que definen un panel son:

$V_{oc}$ : voltaje de la placa en circuito abierto

$I_{sc}$ : intensidad en circuito cerrado

$W_p$ : máxima potencia que ofrece la placa en condiciones estándares

Tienen una eficiencia entorno al 15% y actualmente existen de diferentes materiales. Los modelos más comunes son de 12 y 24 voltios.

Para orientar un panel hacen falta las coordenadas donde estará situado y dos ángulos: inclinación y acimut. El ángulo de inclinación es el que marca la placa con respecto al suelo, por otro lado, el ángulo acimut es el que se genera de la línea transversal de la placa respecto el polo sur geográfico.

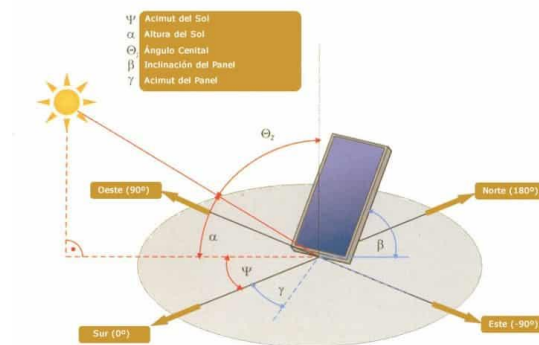


Figura 32: Orientación de una placa solar (Fuente: web de Sunfields solar)

Sobre los paneles actúan dos tipos de radiación, la directa procedente del Sol y la difusa que ha sido previamente dispersada por moléculas de la atmosfera.

### 7.1.1.2. Cálculo del rendimiento de los paneles solares

La descripción de las propiedades de una placa que se dan por los fabricantes supone unas condiciones de trabajo idílicas de irradiancia directa de  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura. Hay que tener en cuenta que estas suposiciones no son alcanzables en el sistema real, ya que la irradiación es variable a lo largo del día y rara vez se alcanza el valor supuesto. Además, cuando lo hace, las temperaturas suelen ser superiores a los  $25^\circ\text{C}$ .

Es necesario saber cómo afecta la variación de estas propiedades sobre la producción de potencia eléctrica de la placa.

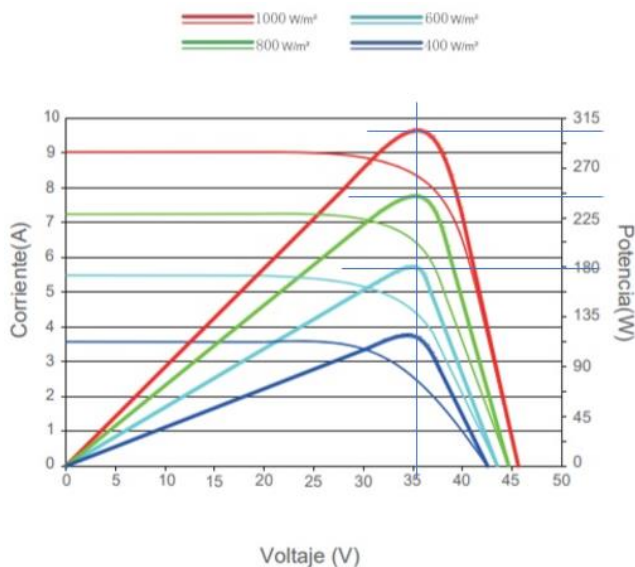


Gráfico 5: Potencia y corriente en función del voltaje de una placa de 305 W (Fuente: web de Rebacas)

En el gráfico se observa como en función de las diferentes irradiaciones procedentes del Sol la potencia que otorgan las placa varía. Se han trazado unas líneas sobre el gráfico en el punto donde el producto de la intensidad y el voltaje es mayor. Se han comparado para cada irradiación la potencia máxima obtenida y se observa que tiene una relación lineal y proporcional a la irradiación. Las pérdidas por irradiación se calcularán así:

$$Rendimiento\ por\ irradiación\ real(\%) = \frac{irradiación\ sobre\ la\ placa}{1000} \quad (20)$$

Otro factor que altera las prestaciones de la placa es la temperatura ambiente. La variación de esta genera un cambio en la eficiencia de producción de energía. Esto es debido a la influencia de la temperatura sobre la intensidad de corto circuito (Isc) y el voltaje en circuito abierto (Voc) como se muestra en el gráfico 4.

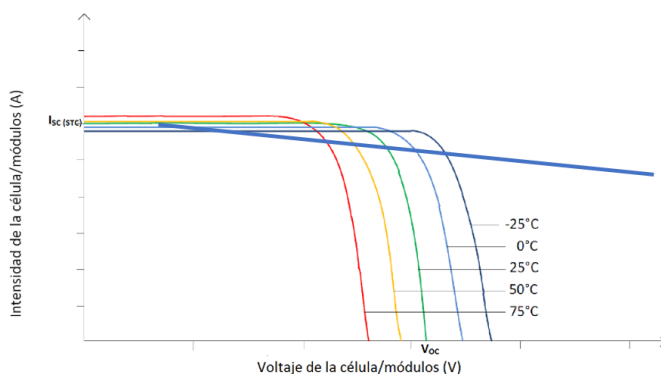


Gráfico 6: Intensidad y voltaje de una placa en función de la temperatura (Fuente: web de Rebacas)

La potencia obtenida para cada temperatura se puede medir y es lineal. El fabricante indica cómo afecta cada °C de diferencia respecto a las condiciones de test.

$$\text{Perdidas por temperatura(\%)} = CP \cdot \Delta T \quad (21)$$

CP= coeficiente de potencia-temperatura (%/°C)

$\Delta T$ = variación de temperatura respecto la temperatura de test

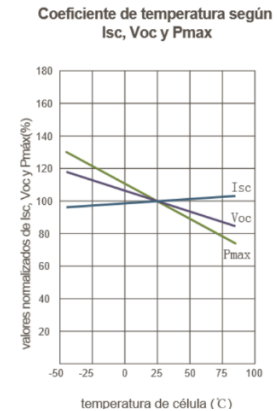


Gráfico 7: Variación de propiedades en función de la temperatura de la celda (Fuente: web de Rebacas)

La potencia otorgada por un panel teniendo en cuenta tanto la irradiancia como la temperatura exterior se calculará de la siguiente manera:

$$P_{RP} = P_{IP} \cdot (\text{Rendimiento por irradiación real}) \cdot (100 - \text{Perdidas por temperatura}) \quad (22)$$

Donde:

- $P_{RP}$ : potencia real de producción
- $P_{RI}$ : potencia ideal de producción que vendrá indicada por el fabricante.

## 7.2. Diseño conceptual de la instalación

Para abastecer la demanda del barco con las placas se han estudiado varias posibilidades.

En un primer momento se pensó en cubrir la demanda con placas solares conectadas a la red, alimentando cuando fuera posible el barco con las placas y en horas donde la producción fuera demasiado baja alimentarse directamente de la red. El problema es que, durante las horas de ausencia de Sol, en las que la barca sigue trabajando, la conexión a la red es inevitable. Esta solución no cumple con que el proyecto sea capaz de autoabastecer la demanda eléctrica del barco y se optó por descartarla.

Finalmente, se pensó en almacenar la energía sobrante que procedía de los paneles en unas baterías de litio, que después el barco utilizaría para cargar las baterías de a bordo. Este proyecto supone una instalación sin precedentes. La alta demanda de energía del barco implica unas baterías de alta capacidad, además de componentes electrónicos, como inversores, que sean capaces de manejarlas. La instalación aun así requiere de estar

conectada a la red para días donde la energía procedente de los paneles y las baterías no sea suficiente para suplir la demanda.

Esta solución cumple con que el proyecto sea capaz de autoabastecer la demanda eléctrica del barco.

El alto número de placas necesarias para cubrir la demanda imposibilita la instalación de los paneles sobre el barco por lo que se diseñara la instalación en un terreno próximo al embarcadero.

### 7.2.1. Cálculos de la instalación

Conociendo la información relativa a los paneles solares se ha procedido a diseñar una instalación de paneles fotovoltaicos acorde con el proyecto de la barcaza eléctrica que pueda abastecer en su totalidad la demanda de esta.

En primer lugar, se ha empezado por realizar un estudio de la zona con el fin de obtener la información referente a la incidencia solar en el lugar de instalación de las placas. La manera de conseguir los datos ha sido a través del programa libre de divulgación científica promovido por la Unión Europea Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). El programa ofrece una gran variedad de datos a partir de las coordenadas y características de los paneles (ángulo de inclinación, material, potencia de trabajo...). La información que otorga el programa es posible gracias a los datos que captan diferentes satélites.



Figura 33: Logo del programa libre utilizado en la recaudación de datos (Fuente web de la PVGIS)

Antes de extraer ningún dato se ha marcado unos condicionantes en el estudio. En este caso ha sido la de dividir el tiempo en meses. Además, las placas tendrán un sistema de sujeción fijo por lo que se habrán de orientar de manera que se aproveche al máximo su eficiencia anual.

La información extraída del programa libre PVGIS ha sido: ángulo óptimo de inclinación y acimut que deberían tener las placas, valor diario de energía solar recibida por metro cuadrado sobre el ángulo de inclinación óptimo y la temperatura media durante el día. Los datos están reflejados en la Tabla 6.

Los ángulos óptimos propuestos por el programa para las coordenadas de la estación del río Coria con altitud 5m son: inclinación 33º, acimut 0º. Suponiendo fijos estos ángulos se ha completado el estudio energético de las placas.



A la tabla 6 se le ha añadido las horas de luz Solar para cada mes. Las horas de luz siguen una función sinusoidal debido al movimiento relativo entre el Sol y la Tierra con la siguiente gráfica.

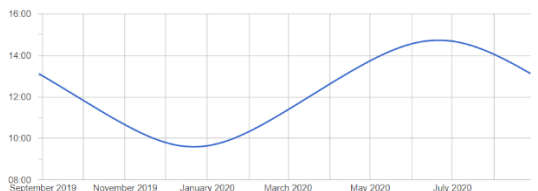


Gráfico 8: Horas de luz solar según el día en Sevilla (Fuente: web de salidaypuestadelsol)

Para dar un valor medio acorde con el mes se han utilizado las horas del día 15 de cada mes como referencia aceptando el error que se pueda cometer.

Mes	Valor medio de irradiación solar sobre ángulo óptimo 33° (kWh·m <sup>-2</sup> ·día <sup>-1</sup> )	T media diaria (°C)	h de sol por día	Potencia media recibida por el Sol (W/m <sup>2</sup> )
ene	4,34	12,9	9,83	441,51
feb	5,27	13,1	10,78	488,87
mar	6,26	16,3	11,11	563,46
abr	6,4	19,4	13,11	488,18
may	6,85	23,4	14,15	484,10
jun	7,23	26,9	14,73	490,84
jul	7,5	29,7	14,53	516,17
ago	7,38	30,2	13,65	540,66
sep	6,53	26,4	12,48	523,24
oct	5,79	22,5	11,3	512,39
nov	4,74	16,9	10,2	464,71
dic	4,08	14	9,58	425,89

Tabla 6: Datos de radiación solar en el lugar de la embarcación (Fuente elaboración propia)

En la tabla se observa como los meses correspondientes al horario de verano en general tienen valores de irradiación más elevados al igual que un mayor número de horas de Sol.

Para conseguir la potencia del Sol media que incide por cada metro cuadrado de superficie inclinada se ha realizado el siguiente cálculo:

$$\text{radiación solar media} (W \cdot m^{-2} \cdot \text{día}^{-1}) = \frac{\text{irradiación solar} (kWh \cdot m^{-2} \cdot \text{día}^{-1})}{\text{horas de sol} (h) \cdot 1000} \quad (21)$$

Haciendo esta consideración se supone que la potencia recibida es constante durante todo el día solar, algo que no es cierto ya que esta varía en función de la hora, pero es una simplificación válida a la hora de realizar los cálculos de dimensionamiento y se han simplificado así las operaciones.

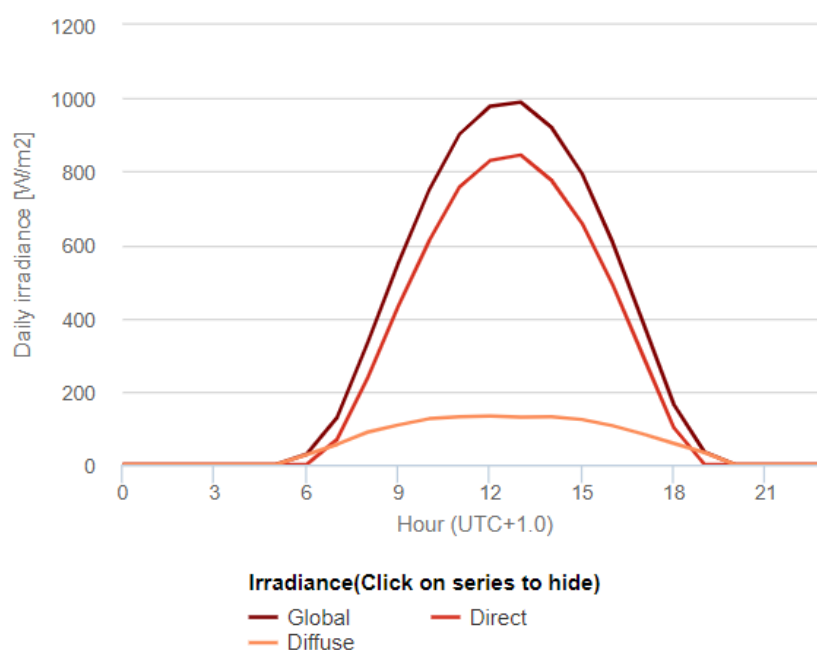


Gráfico 9: Ejemplo de irradiancia y tipo para el mes de julio según la hora del día (Fuente: PVGIS)

Aun así, a la hora de escoger los elementos que componen la instalación se habrá de tener en cuenta que las placas pueden llegar a funcionar a su máxima potencia las horas de alta irradiación.

### 7.2.2. Selección de los elementos de la instalación

Para la búsqueda de los elementos que componen la instalación de los paneles eléctricos se ha utilizado la página web <https://autosolar.es> que ofrece una gran variedad de ofertas y productos relacionados con la energía solar. En esta página se oferta un kit solar con prestaciones muy similares a las que la barcaza necesita que se ha adaptado al caso de estudio.

### 7.2.2.1. Paneles solares

El panel solar escogido para la instalación ha sido un panel policristalino de 72 células con una potencia de producción idílica de 335W de la marca ERA solar. Sus dimensiones son 2 m de largo por 1 de ancho y trabajan a un voltaje de 24 V. El motivo de la elección ha sido las altas prestaciones que ofrece para el precio de mercado (Ver anexo 5)



Figura 34: Panel policristalino ERA 335W, 24V (fuente: Autosolar)

Con los paneles escogidos se procede a calcular el dimensionamiento de la planta solar. Previamente se ha calculado la eficiencia real para las condiciones de trabajo y las necesidades energéticas de cada mes:

$$\text{Energía producción diaria(Wh)} = \frac{\text{Energía consumida diaria(Wh)}}{\eta_{\text{instalación}}} \quad (22)$$

El rendimiento de la instalación depende del cableado, baterías e inversor únicamente. Ha sido calculado,  $\eta_{\text{inst}} = 0,83$ . Esto quiere decir que por cada 1 kW que demande la barca la instalación ha de ser capaz de producir 1,2 kW debido a las pérdidas. El número de placas que se han decidido instalar son 120 (240m<sup>2</sup> de paneles), con el fin de cubrir la demanda diaria para todos los meses con un margen de excedente. La capacidad de producción de energía de la instalación se calcula a partir de la potencia media recibida del Sol, la temperatura diaria y las horas de Sol. Ver fórmula (22).

Mes	Consumo(kWh)	Capacidad de producción de energía (Wh/día)	Excedente (kWh)
ene	147,3	182,5	35,1
feb	147,3	221,4	74,1
mar	200,6	260,0	59,4
abr	200,6	262,8	62,2
may	200,6	277,0	76,5
jun	200,6	288,5	88,0
jul	200,6	296,1	95,6
ago	200,6	290,8	90,3
sep	147,3	261,1	113,8
oct	147,3	235,0	87,6
nov	147,3	196,4	49,1
dic	147,3	170,9	23,5

Tabla 7: Datos de recepción de energía de las 70 placas (Fuente: elaboración propia)

Algunos meses tienen un excedente mayor que otros debido a la irradiación solar y el gasto energético. El excedente de producción energético se ha decidido enviar a la red eléctrica. Por contra, el escaso margen de excedente, durante algunos meses, obliga a conectarse a la red en el caso de escasez de energía solar que pueden causar los días nublados donde la radiación procedente del Sol se reduce a un 20%.

#### 7.2.2.2. Baterías de almacenamiento

Para que la barca pueda funcionar en horarios de ausencia de Sol o cuando la irradiación sea demasiado baja para que la potencia producida por las placas cargue la barca se deben colocar unas baterías de almacenamiento que cumplan con la función de abastecer energéticamente la demanda del barco.

Para buscar la máxima rentabilidad de las baterías de almacenamiento se debe estudiar la capacidad óptima de ellas. Evitando instalar unas baterías con una capacidad sobredimensionada o insuficiente.

Para decidir la capacidad se debería optar por el análisis detallado de los meses con peores condiciones externas (menos horas de Sol y menor irradiación) de cada horario, como es el caso marzo en verano y diciembre en invierno.

Este cálculo no se ha realizado en el proyecto y se ha dejado abierto para un estudio próximo.

Las baterías utilizadas corresponderían al modelo de Batería Estacionaria Ultracell OPzS 1400Ah. Cada una cuenta con un voltaje de 2V y una profundidad de descarga máxima del 50%. El número de baterías dependerá del estudio pendiente de realizar del dimensionamiento de la batería.



Figura 35: Batería estacionaria de 2V (Fuente: web de Autosolar)

### 7.2.2.3. Otros componentes

- **Estructura fija:** Para la sujeción de las placas en un cierto ángulo se ha empleado una estructura de fijación de 10 paneles de 72 celdas para suelo. Los paneles se han de colocar de forma vertical sobre la estructura y han sido necesarias 12 unidades para la sujeción de los 120 paneles. La estructura eleva las placas a una altura mínima de 2m y la sujeción tiene medidas de 5,5m de largo por 4m de alto. Está fabricada de aluminio.

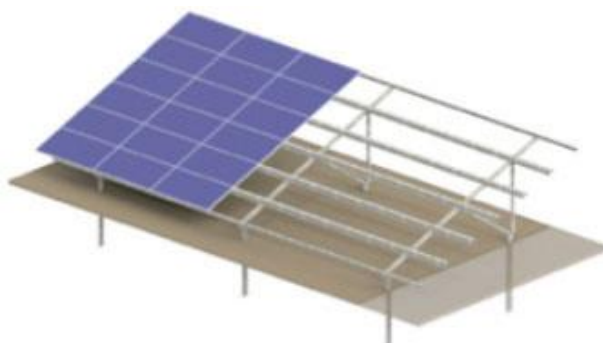


Figura 36: Soporte de los paneles (Fuente: web de Autosolar)

- **Inversor:** El inversor que se ha utilizado para conectar la instalación solar con el circuito de la barcaza ha sido el Inversor Trifásico híbrido 10kW Infinisolar. Se ha requerido de 3 unidades conectadas en paralelo, trabajan a una potencia pico de 15 kW. Los inversores híbridos son capaces de administrar la energía procedente de los paneles y almacenarla en las baterías, además si hay un exceso o una falta de energía conectan con la red para alimentar las baterías o la propia red. El propio inversor se encarga de realizar la función de un regulador de carga MPPT que consiste en administrar la intensidad que circula por las placas para acercarlos al punto de máxima potencia.



Figura 37: Inversores híbridos 10 kw de la instalación (Fuente: web de Autosolar)

- **Vatímetro:** Unidad para la medición de potencia de la instalación utilizada por el inversor.
- **Cableado placas:** 400 metros de Cable Rojo PV ZZ-F de 6mm<sup>2</sup> y 400 metros de Cable Negro PV ZZ-F de 6mm<sup>2</sup>. Se utiliza en las instalaciones solares entre los paneles para hacer los paralelos en el repartidor de corriente o para llevar la energía de estos hasta el regulador de carga.



Figura 38: Cableado de placas (Fuente: web de Autosolar)



Figura 39: Cableado de baterías (Fuente: web de Autosolar)

- **Cableado baterías:** 5 unidades de 1 metro de Cable Verde ZZ-F 50mm<sup>2</sup> y 5 unidades de 1 metro de Cable Negro RV-K 50mm<sup>2</sup>. El cable de 50mm<sup>2</sup> se utiliza en las instalaciones solares como cable de transporte de corriente entre la batería y el inversor. Se sirven dos unidades debido a la elevada potencia del inversor, para que cuando se requiere mucha energía no haya problemas de sobrecalentamiento sin requerir secciones mayores.

### 7.2.3. Conexión de la instalación

Un problema al que se ha tenido que hacer frente una vez escogidos los componentes es la necesidad de conectarlos de manera correcta y a la vez con una configuración de máxima eficiencia.

Los paneles se conectan en serie entre ellos formando grupos. El número de paneles conectados en serie marcará el voltaje total del grupo. En el caso de la instalación del trabajo como se cuenta con 120 paneles que han sido divididos en cuatro grupos de 30 paneles cada uno, con 720V. Este valor cumple con las especificaciones del inversor que requiere grupos de 400V a 800V para trabajar eficientemente.

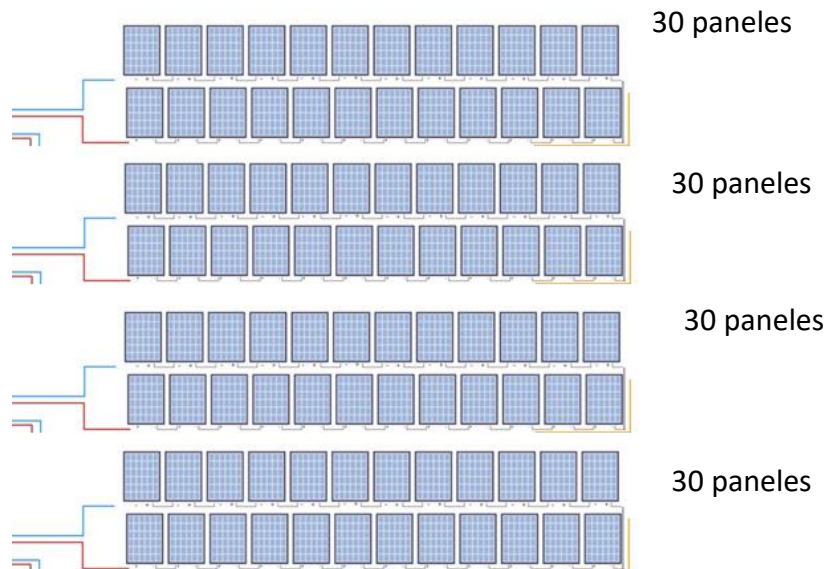


Figura 40: Conexión de las placas fotovoltaicas (Fuente: elaboración propia)

Estos grupos de paneles se conectan al inversor. El inversor se encuentra a la vez conectado a las baterías con una salida de 48V, donde se almacena energía, a los cargadores de la estación que utiliza la barca para consumo propio y a la red en caso de haber necesidad o excedente de energía en algún momento.

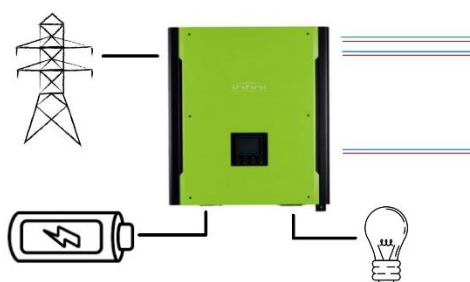


Figura 41: Conexión del inversor (Fuente: elaboración propia)

#### 7.2.4. Dimensiones de la instalación

A la hora de determinar el espacio que ocuparán los paneles fotovoltaicos no solo se ha de tener en cuenta el área útil de estos, también se debe contar con que proyectan una sombra fruto de la inclinación de los rayos procedentes del Sol respecto el suelo. Para la correcta disposición de las placas se debe entender que el Sol no siempre incide con el mismo ángulo sobre la Tierra. La incidencia de los rayos se divide en dos ángulos, azimut y de declinación.

El ángulo de declinación es el que ha marcado el dimensionamiento entre placas, concretamente el menor valor de este ya que implica la mayor área de sombra proyectada. Este ángulo varía según la hora del día, pero adquiere su valor más bajo cuando el Sol se encuentra sobre la línea del polo sur. Este valor mínimo también varía según el día del año teniendo su posición más baja en invierno con un ángulo de  $35^\circ$ , el fenómeno es conocido como solsticio de invierno.

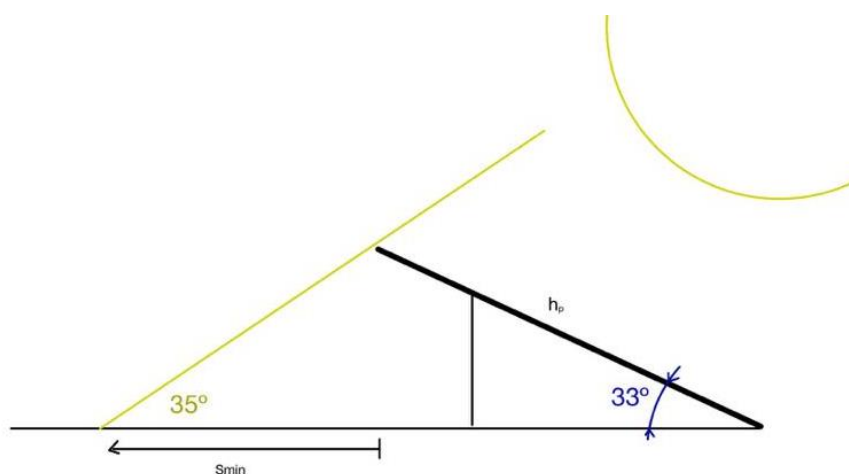


Figura 42: Incidencia de los rayos de sol sobre las placas los días de solsticio (Fuente: elaboración propia)



A partir de relaciones trigonométricas se obtiene la longitud de separación mínima entre placas necesarias para que entre dos filas de paneles no se tapen. Siendo  $h_p$  la altura de una placa (2m):

$$s_{min} = \frac{2 \cdot h_p \cdot \text{sen}(33^\circ)}{\text{tg}(35^\circ)} = 3,12m \quad (24)$$

La separación mínima entre placas es de 3,12 metros en dirección sur. De esta manera el área que ocupan un conjunto de diez paneles situados en los soportes se encuentra con la ecuación:

$$A_{real} = a_p \cdot (2 \cdot h_p \cdot \cos(33^\circ) + s_{min}) = 35,61m^2 \quad (25)$$

$a_p$ =anchura del soporte

La última fila estará exenta de la suma de la separación mínima en su área ya que no importa si proyecta sombra sobre el suelo.

Utilizando la herramienta que ofrece la aplicación de Google Maps se ha rastreado un terreno cercano al embarcadero de la barcaza aparentemente improductivo.



Figura 43: Localización de la instalación solar (Fuente: Google maps)

El proyecto plantea el emplazamiento de las placas en este lugar. La disposición de los módulos que se diseña es en filas de 2 con una separación entre ellos de 1,5 m y una fila final con un solo modulo. Como el terreno no se encuentra orientado hacia el sur y se desea aprovechar el perfil de este para optimizar el espacio el área que ocupen tiene un perfil inclinado que persigue la línea que el terreno forma con el polo sur:

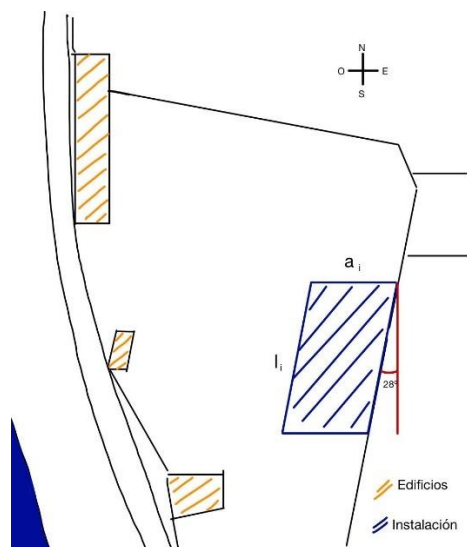


Figura 44: Mapa de la superficie ocupada por los paneles sobre el terreno (Fuente: elaboración propia)

La idea ha sido alejar lo máximo posible los paneles de los edificios y evitar cortar un camino situado en la parte norte del terreno. Para definir la superficie que ocupen las placas se han calculado dos valores: ancho de instalación,  $a_i$  y largo de instalación,  $l_i$ . Sabiendo que la separación sur entre placas debe ser de  $s_{min}$  en dirección norte-sur se obtiene el valor de  $l_i$ :

$$l_i = \frac{5 \cdot s_{min} + 6 \cdot 2 \cdot h_p \cdot \cos(33)}{\cos(28^\circ)} = 40,46 \text{ m} \quad (26)$$

La asignación del valor de  $a_i$  depende del ancho de los módulos que es de 5,5 m y de una distancia de separación entre módulos. Se ha escogido un valor de 15 m. El área ocupada por la instalación es de 341 m<sup>2</sup>.

En el estudio fotovoltaico se ha demostrado que a día de hoy existe una alternativa tecnológica que puede proporcionar suficiente energía para asegurar el servicio de una barcaza eléctrica 100% sostenible.

## 8. Presupuesto del proyecto

Para realizar el análisis económico del trabajo realizado durante el proyecto y poder dar un presupuesto ajustado a la realidad se han tenido en cuenta aspectos como las horas empleadas en la elaboración del proyecto diferenciadas en:

- Investigación: proceso de búsqueda de la información necesaria para realizar el proyecto, la manera de realizarlo ha sido principalmente a través de internet.
- Planificación: proceso de organización del trabajo e ideas.
- Cálculos: necesarios para dimensionar el proyecto.
- Simulación: realización de múltiples ensayos con ANSYS.
- Redacción: elaboración de la memoria del trabajo.
- Diseño de estructuras: Diseño con el programa SOLIDWORKS.
- Elaboración diseños gráficos: Creación de imágenes, diagramas y capturas de programas.
- Reuniones: conversaciones con el tutor y los encargados de la empresa.

La estimación de horas empleadas en cada uno de los procesos anteriores es de:

	horas
PLANIFICACIÓN	12
INVESTIGACIÓN	98
REUNIONES	11
DISEÑO DE ESTRUCTURAS	27
SIMULACIÓN	78
CÁLCULOS	26
ELABORACIÓN DE DISEÑOS GRÁFICOS	16
REDACCIÓN	180
TOTAL	448

A este computo de horas no se ha añadido la preparación y presentación de la defensa del TFG. Si se considera que las horas de trabajo se pagan como un becario de la UPC a 8 euros la hora:

El precio que se pediría por la elaboración de este proyecto sería de 3.584€ si se cuenta únicamente con el trabajo invertido.

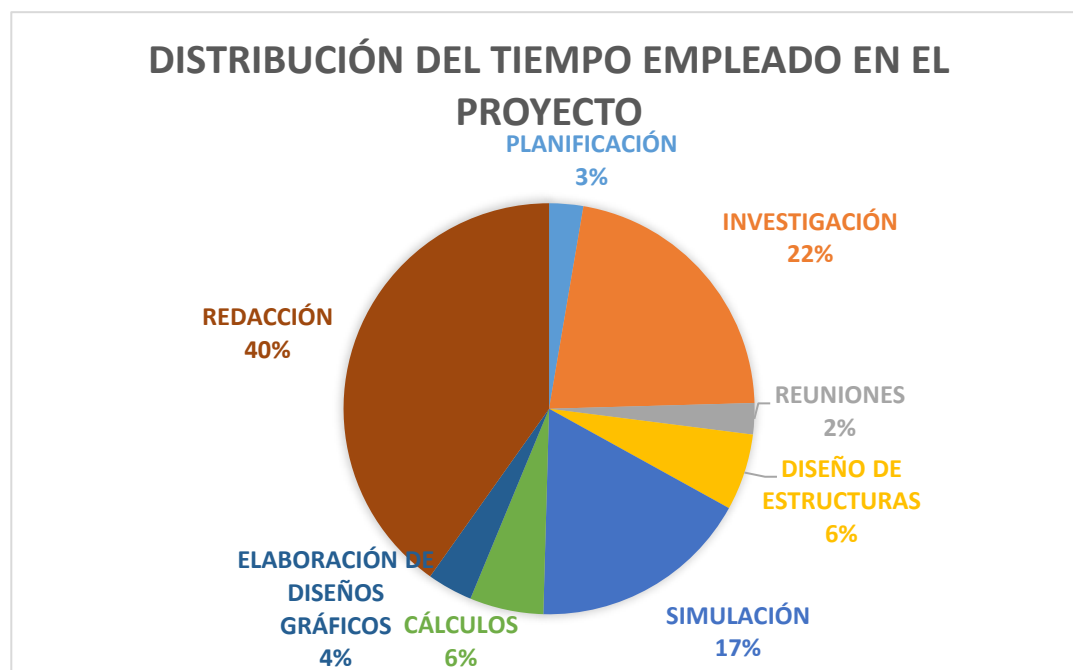


Gráfico 10: Distribución del tiempo empleado en el proyecto

Además, en este presupuesto se debe considerar el precio del software utilizado con el precio que ha costado al usuario:

Licencia de SOLIDWORKS: gratuita con la matrícula de la universidad.

ANSYS Student: gratuito para cualquier usuario.

Licencia de Microsoft Office: 40,46 €

Aplicación de diseño gráfico GoodNotes: 7,65€

Los costes del software han corrido a cargo exclusivamente del alumno autor de proyecto al que pertenecen las licencias de los programas no gratuitos.

## 9. Impacto ambiental

Se trata de un proyecto con un impacto medioambiental muy positivo, ya que se propone sustituir una barcaza que utiliza combustibles contaminantes, gasoil, por una barcaza propulsada por un motor eléctrico que supone cero emisiones. Los motores diésel emiten dióxido de carbono, pero además son potentes generadores de dióxido de nitrógeno y partículas sólidas, lo cual supone un alto nivel de contaminación en el aire. Estas emisiones pueden incluso llegar a provocar problemas respiratorios o cáncer.

A pesar de ser una embarcación fluvial, se debe tener en cuenta que según la Organización Marítima Internacional (OMI) los barcos son los principales emisores de dióxido de carbono a la atmósfera y calcula que las embarcaciones de alta mar liberan alrededor de 1.120 millones toneladas métricas de dióxido de carbono en un año. Esta cifra es equivalente a las emisiones anuales de gases de efecto invernadero de más de 205 millones de coches.

Se debe tener presente el ahorro de emisiones que supone la sustitución de motores diésel por motores eléctricos. Si el motor diésel de una embarcación similar emite 3.2 kg de CO<sub>2</sub> por litro de gasóleo (dato extraído de “*Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero 2011*” publicado por la Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (GEI) y la barcaza consume unos 25 litros de diésel diarios, emitiría 80 kg de CO<sub>2</sub> al día que con una tracción eléctrica supondría una emisión de 0 kg de CO<sub>2</sub> y al año (teniendo en cuenta la diferencia de viajes según las estaciones) un ahorro de 25 toneladas de CO<sub>2</sub>.

Además, la electricidad como energía puede tener un origen “sucio” y en este proyecto se ha diseñado una instalación fotovoltaica para alimentar las baterías de la embarcación. Todo esto supone cerrar un proyecto absolutamente sostenible.

También debemos tener en cuenta la disminución de contaminación sonora que aporta el proyecto ya que se desarrolla en un medio natural (ecosistema fluvial) especialmente sensible a estos efectos.



## Conclusiones

Este trabajo de Fin de Grado tiene un objetivo claro que es diseñar una embarcación eléctrica capaz de dar un servicio de transporte aplicado a una situación real. Alcanzar el objetivo ha supuesto un gran esfuerzo de documentación, investigación, cálculo y toma de decisiones. Esto ha obligado a consultar videos, artículos, páginas web y a buscar una situación real en la que poder desarrollar el proyecto. La realidad del proyecto la proporciona el servicio que ofrece la empresa *Transportes fluviales de Coria del Río SL* con su flota de barcas que facilitan el paso de un margen a otro del Guadalquivir en la localidad sevillana de Coria del Río. La comunicación con esta empresa ha proporcionado valiosos datos que han hecho posible la concreción del proyecto.

El trabajo en su desarrollo se ha ido haciendo más complejo y así buscando la sostenibilidad del diseño se ha añadido la instalación de una central fotovoltaica que aporta energía suficiente para cargar las baterías de la barcaza y cerrar un proyecto absolutamente sostenible.

Así después de planificar y desarrollar este estudio se pueden extraer una serie de conclusiones.

La primera es que en el sector naval existe, actualmente, una escasa oferta de embarcaciones eléctricas, orientada a pequeñas embarcaciones destinadas al ocio, al transporte de pocos pasajeros o embarcaciones complementarias. Como se recogen en numerosos estudios consultados es el sector del transporte que menos ha iniciado el estudio y aplicación de una transición energética.

En este sentido el diseño de una embarcación eléctrica sin emisiones es un proyecto muy atractivo ya que una embarcación que no requiere carburantes que contaminan, supone un impulso a la sostenibilidad y a la innovación tecnológica. Otro punto importante es que el estudio se aplica en situación real que pretende sustituir las barcas de motor de combustión que realizan la navegación fluvial en la empresa *Transportes fluviales de Coria, SL*, sin alterar su filosofía.

El primer reto del proyecto ha sido diseñar la embarcación teniendo en cuenta unos condicionantes, sus dimensiones, su propulsión y elementos estructurales. Finalmente se ha diseñado una embarcación con una superficie útil de 84m<sup>2</sup> teniendo 12m de largo por 7m de ancho, con una propulsión con un sistema Z-drive azimuth que posibilita un giro de las hélices de 360° permitiendo así el control en ambos sentidos de la barcaza. Para diseñar el barco se ha utilizado el programa SOLIDWORKS un software con licencia de la UPC que permite elaborar estructuras de cualquier tipo.

Una vez se ha diseñado el barco se ha calculado la fuerza externa necesaria que han de vencer por los motores para mover la barcaza y cruzar el río en 1 o 1,5 minutos, transportando en cada viaje 33,7 toneladas de las cuales 24 son su propio peso.

Los cálculos de obtención del calado y volumen sumergido se han hecho con el fin de realizar una simulación que cumpliera con las condiciones de trabajo a las que la barcaza deberá responder cuando asuma el servicio y así calcular la potencia requerida a los motores.

Después del análisis, teniendo en cuenta la eficiencia de los elementos de propulsión, se ha obtenido que con dos motores de 25 kW la barcaza podrá cruzar el río en el intervalo de tiempo deseado. A partir de esto se ha calculado la energía necesaria para efectuar un cruce y se ha obtenido que con unas baterías de 30,5 kWh se obtendría un resultado eficiente. Habiendo seleccionado los motores y las baterías para su correcta aplicación es necesario un sistema eléctrico acorde con las necesidades de consumo de estos y que permita la compatibilidad.

Después de todo el análisis, cálculo y diseño se puede concluir que tecnológicamente es posible la construcción de una embarcación eléctrica que sustituya a una embarcación diésel.

El proyecto se complementa con el diseño de una central fotovoltaica capaz de generar la energía que abastece al barco. Ha sido situada en una zona improductiva próxima al embarcadero con una extensión total de 341 m<sup>2</sup>. Coria del Río tiene una situación geográfica privilegiada ya que se encuentra en una zona con alta irradiación solar durante todo el año. Para cargar las baterías se han instalado inversores híbridos cuyas funciones son óptimas para las demandas del proyecto.

La decisión de placas solares fijas implica un menor aprovechamiento solar, pero el precio de la instalación compensa ya que como se ha dicho aún así se cumple con la demanda de energía. La exigencia de cumplimiento de demanda para todos los meses implica que durante algunas épocas del año se produzca un exceso de energía que será enviado a la red eléctrica.

La realización de un proyecto de este tipo ha supuesto una inversión de más de 448 horas de trabajo, debido al difícil acceso a algunos datos, la complejidad tecnológica, la necesidad de dominio de muchos campos y la dimensión del proyecto. Esto se ve reflejado en que se ha invertido un tiempo mayor al previsto que corresponde a la obtención de 12 créditos universitarios.

El impacto medioambiental positivo que supone la sustitución de una barcaza diésel a una barcaza eléctrica es evidente y más si, como en este caso, la carga de las baterías proviene



de una instalación fotovoltaica. En este trabajo se ha realizado una cuantificación de este impacto y se ha calculado que solo en emisiones de CO<sub>2</sub> se ahorrarían al año 25.250 kg de CO<sub>2</sub> expulsado a la atmosfera.

Finalmente se puede afirmar que este proyecto es un intento de extender la aplicación de los motores eléctricos a todos los transportes y una apuesta por la sostenibilidad energética sin renunciar a la eficiencia.



## Bibliografía

- [1] Filosofía de Transportes fluviales de Coria del Río  
<https://labarcadecoriatransportesfluvialescoriasl.com>
- [2] Características sobre barcos  
<https://www.cosasdebarcos.com/blog/consejos/barcos-a-motor-tipos-motores-y-usos/#desplazamiento-o-planeo>
- [3] Selección de palas  
<http://www.touron-nautica.com/contacta-con-touron/273-helices-principal/sobre-las-helices/1271-como-seleccionar-la-helice>
- [4] Peso medio de un hombre  
<https://www.elmundo.es/magazine/2003/172/1042211422.html>
- [5] ¿Cuál es el mejor tipo de baterías para un barco?  
<http://disvent.freshdesk.com/>
- [6] Componentes eléctricos para barcos  
<http://torgeedo.com>
- [7] Sobre baterías  
<http://www.coveyelectricmarine.com>
- [8] Conexión de cables de un inversor  
<https://www.electricpropulsionsystems.com>
- [9] Promedio anual de irradiación solar en España  
<http://www.adrase.com>
- [10] Salida y puesta de sol de Sevilla  
[https://salidaypuestadelsol.com/spain/dos\\_hermanas\\_6018.html](https://salidaypuestadelsol.com/spain/dos_hermanas_6018.html)
- [11] Rendimiento de engranajes  
<https://www.meadinfo.org/2008/11/gear-efficiency-spur-helical-bevel-worm.html>
- [12] Otro ejemplo de barcas  
<https://products.damen.com/en/ranges/modular-ferry/modular-ferry-2010>

[13] Consumo de a bordo

<https://www.nauticayyates.com/equipo/energia-a-bordo-embarcacion/>

[14] Conexión de los paneles

[https://www.youtube.com/watch?v=9FCfVQRwY\\_w&t=1165s](https://www.youtube.com/watch?v=9FCfVQRwY_w&t=1165s)

[15] Productos solares

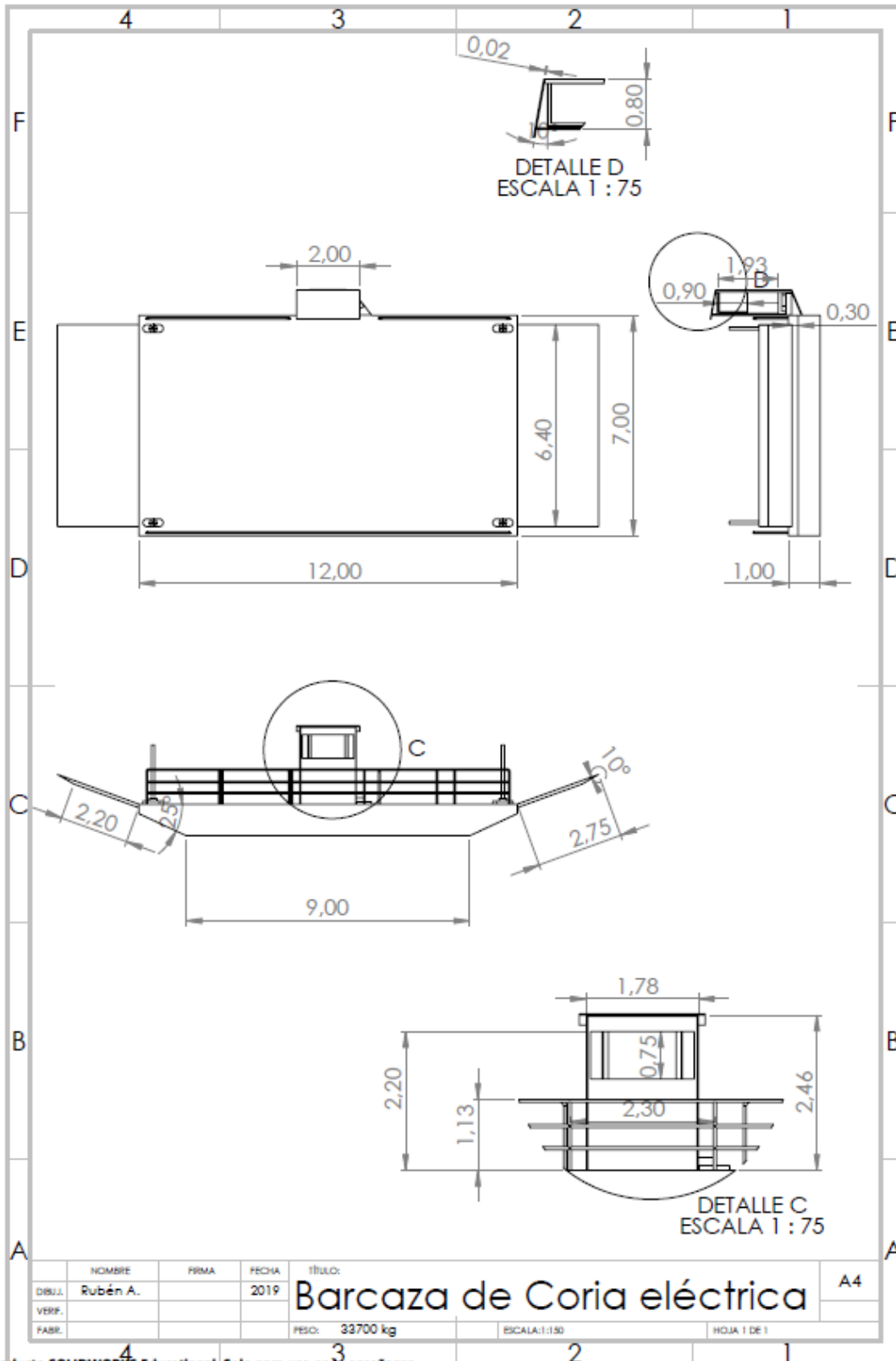
<https://www.autosolar.es>

[16] Venta de productos náuticos

<https://www.nauticexpo.es>

## **Anexos**

# A1. Plano de la embarcación



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

## A2. Simulación en ANSYS

### 1. Workbench 2019 R1

El proyecto ha sido dirigido desde el Workbench de ANSYS donde incorpora todos sus subprogramas. Para el cálculo del  $C_D$  se utilizará el subprograma *Fluent*. Este requiere de una geometría, un mallado y una situación de trabajo y genera una solución.

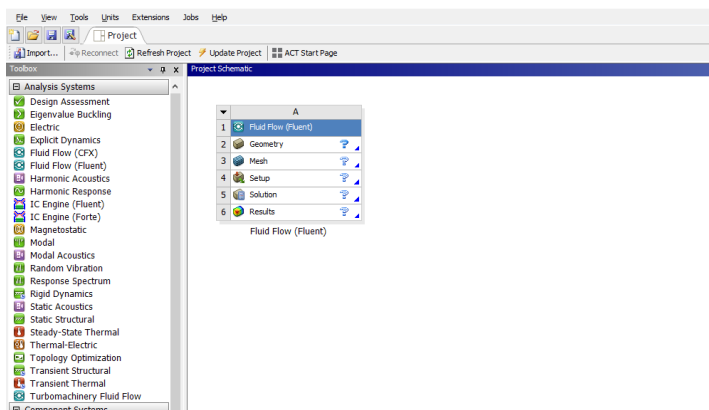


Figura 45: Imagen del Workbench de ANSYS (Fuente: elaboración propia)

### 2. Geometría

Para realizar la simulación se ha diferenciado la parte que queda sumergida en el agua del resto que queda bajo el efecto del aire.

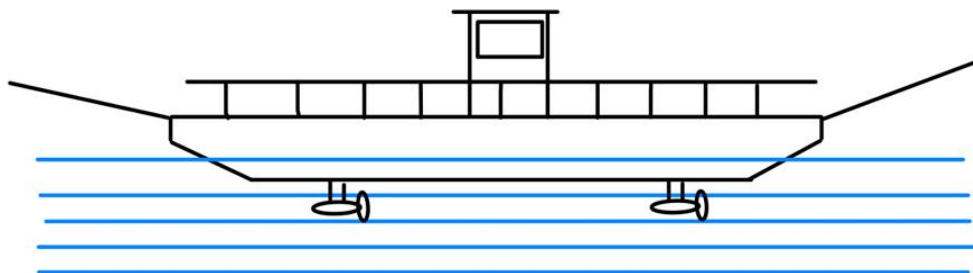


Figura 46: Incidencia del agua y el aire en las partes del barco (Fuente: elaboración propia)

Tan solo se ha tenido en cuenta la fuerza que produce el agua sobre la embarcación. La simplificación se debe a la diferencia entre las densidades, que actúa proporcionalmente sobre la fuerza de arrastre (10), esto hace que el valor que pueda tener la resistencia al aire sea muy pequeño.

$$\frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} \cdot 100 = \frac{1,2}{998,2} \cdot 100 = 0,12 \% \quad (27)$$

El valor de 0,12% evidencia que por alta que sea la diferencia que haya entre los demás parámetros de drag el resultado puede ser despreciable.

Se ha importado el archivo de la geometría previamente diseñada en *SOLIDWORKS*. Esta no ha podido ser el archivo creado en el punto 4 debido a la incompatibilidad del programa con los archivos externos usados. Se ha utilizado pues, una estrategia de copia de los archivos Z-drive que generaban el error. A través de la herramienta de medición de *SOLIDWORKS* se han conseguido las medidas de los sistemas y se han calcado sobre un formato que no genera errores de compatibilidad como muestra la figura 47.

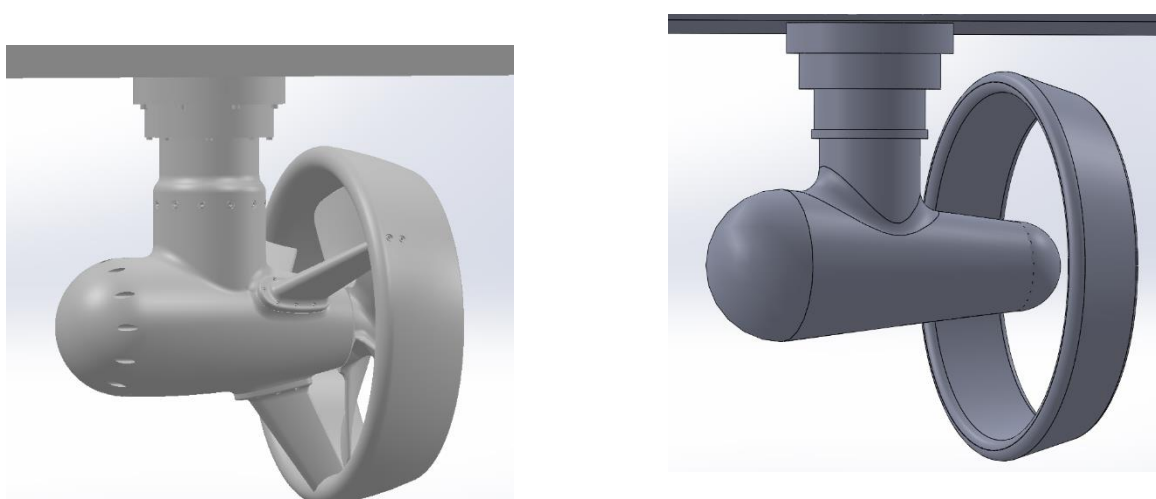


Figura 47: Sistema Z-drive original y su calcado para la simulación (Fuente: elaboración propia)

En este caso la nueva geometría generada tampoco ha resultado válida para la simulación, ya que, la complejidad de sus formas impide que con la licencia de estudiante de *ANSYS* se pueda llegar a un resultado fiable. Se ha optado en sustituir los dos sistemas con unos cilindros de mismo diámetro que el diámetro máximo de estos y una altura de 0,6 metros. Esta geometría ha sido la utilizada finalmente:



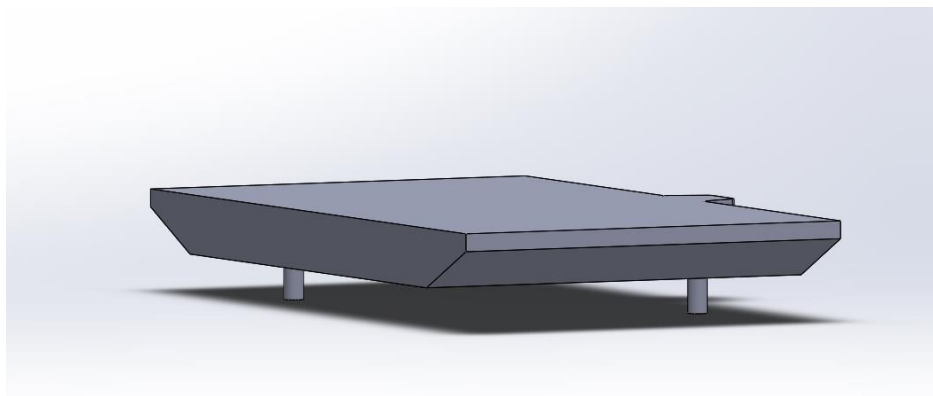


Figura 48: Geometría compatible usada para la simulación (Fuente: elaboración propia)

Únicamente se ha utilizado el casco de la embarcación ya que el resto no está bajo la influencia del flujo de agua.

Una vez importada la geometría se ha dispuesto a crear la superficie de agua que envuelve la barcaza. Para ello se ha creado una superficie rectangular y una posterior extrusión respetando el calado calculado en el punto 4.2.2.3, con 11 m de ancho y 18 m de largo. La profundidad del agua se ha considerado de 3 m para dejar un margen amplio al flujo de agua.

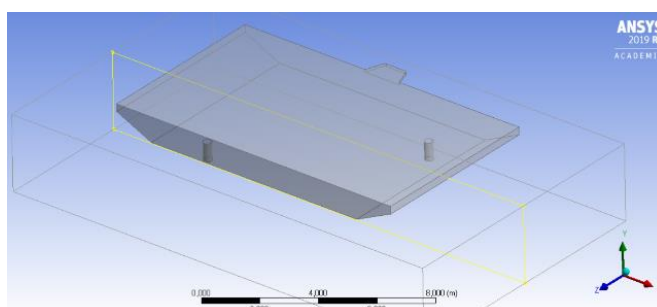


Figura 49: Sketching del fluido (Fuente: elaboración propia)

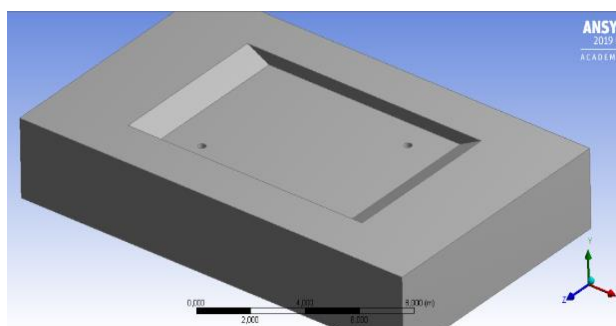


Figura 50: Booleano de la barcaza y el agua (Fuente: elaboración propia)

Por último, se ha creado un booleano que une el fluido con el sólido como muestra la figura 50 necesario para montar y ejecutar la situación de trabajo.

### 3. Mallado

Para escoger el mallado más adecuado y que ofrezca un error pequeño se ha utilizado un mecanismo de refinamiento comparando los resultados obtenidos para diferentes tamaños de los elementos. Además, se cuenta con la restricción de la licencia del software que impide una malla con más de 512.000 celdas.

Para comprobar la calidad de cada mallado ha sido necesario ejecutar la simulación completa y evaluar los resultados obtenidos.

Primero se ha generado el mallado por defecto que recomienda ANSYS. El programa crea un mallado por defecto en función del tamaño del sólido y mejora su calidad en los puntos que considera pueda haber un punto conflictivo, en este caso han sido los motores. La malla por defecto se muestra en la figura 51.

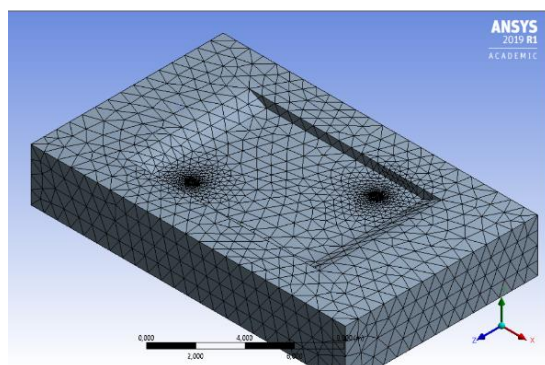


Figura 51: Mallado predeterminado (Fuente: elaboración propia)

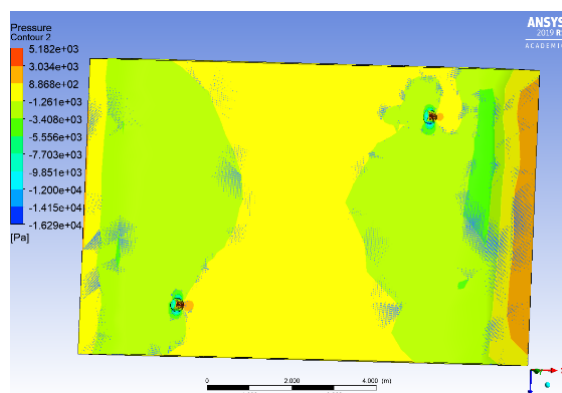


Figura 52: Resultados mallado predeterminado (Fuente: elaboración propia)

El análisis de resultados, que implica la simulación completa en ANSYS, demuestra que esta malla no es fiable (figura 52) ya que el dibujo que generan las presiones sobre el casco es basto y no permite una clara diferenciación de estas. Se ha realizado un refinamiento de la malla en la zona del casco que es la que interesa para el estudio. Los motores no son necesarios retocarlos ya que tienen una malla especial marcada por defecto. El cuerpo del fluido no se modifica porque no forma parte del estudio.

Se ha ido variando el tamaño de los elementos del mallado que componen el casco y se han anotado los resultados correspondientes a cada uno y explorado gráficamente. Sus resultados se muestran en la Tabla 8:

Tamaño elemento_wall (m)	$C_D$ obtenido	Error relativo (%)
Por defecto	0,5205453	
0,45	0,48750341	6,347553229
0,4	0,40980286	15,93846287
0,35	0,39539117	3,516737292
0,3	0,39168736	0,936745755
0,25	0,39245873	-0,196935127
0,2	No permite	-

Tabla 8: Coeficiente de drag para diferentes mallados (Fuente: elaboración propia)

Se observa que un cambio de 5cm en el tamaño de los elementos produce cambios significativos en el  $C_D$ . La solución se estabiliza cuando el tamaño de los elementos se acerca al intervalo [0,35 , 0,2]m. Se ha elegido para el estudio la malla de 0,3 m ya que tan apenas dista de una malla más pequeña y la exploración de los resultados ha sido considerada mejor.

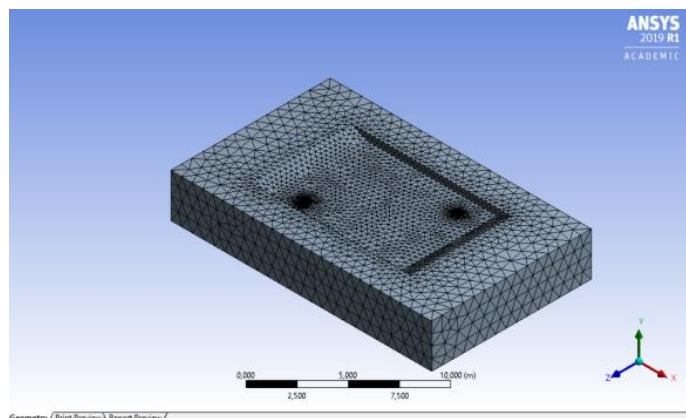


Figura 53: Mallado óptimo (Fuente: elaboración propia)

#### 4. Situación de trabajo (Set up)

Previamente a ejecutar la simulación se ha tenido que asignar unas condiciones sobre el entorno.

##### a. Superficies nombradas

El Set up comienza por asignar a cada superficie del booleano (figura 50) su función correspondiente porque así lo requiere ANSYS. La superficie por donde entra el flujo de agua se denomina inlet, mientras que la superficie de salida se denomina outlet. La superficie de agua restante recibe el nombre de sym (simetría). Por último, se asigna wall a la superficie de la barcaza sumergida.

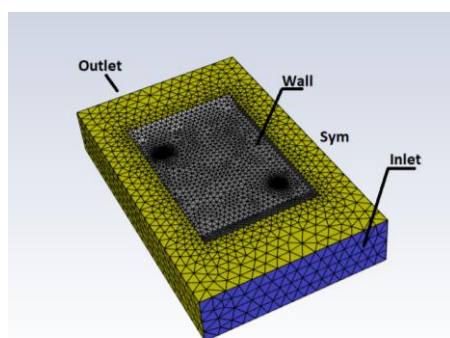


Figura 54: Superficies nombradas (Fuente: elaboración propia)

##### b. Condiciones de trabajo

Una vez se ha tenido definido el mallado y las superficies se procede a marcar las situaciones a las cuales estará sometida la barcaza.

Se empieza por determinar si el flujo es laminar o turbulento. Cada uno requiere de un método de estudio diferente y se determina con el número de Reynolds, si este se encuentra por encima de  $Re > 3000$  es turbulento y si  $Re < 2000$  es laminar. En otro caso será de transición. El número de Reynolds se encuentra de la siguiente manera:

$$Re = \frac{v_{fs} \cdot \rho_{agua} \cdot d}{\mu_{agua}} \quad (28)$$

**d**: longitud característica, en el caso de nuestra barcaza es la longitud de la manga (7m).

**$\mu_{agua}$** : Viscosidad del agua ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Se comprueba que para una velocidad de 1km/h el Reynolds es de 193.707 muy superior al límite turbulento.

Se ha utilizado un método de cálculo para flujos turbulentos. En este caso ha sido mediante el método iterativo k- $\epsilon$ .

Se fijan la fuerza de la gravedad en dirección Y negativa de  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , la presión atmosférica y las propiedades del fluido que atravesarán la geometría que se cogen de la base de datos del propio programa que tiene registradas en el fichero de nombre h2o.

Se ha relacionado el fluido con la geometría y se ha procedido a marcar para cada superficie su correspondiente función.

- Inlet: se fija la velocidad de entrada del fluido.
- Outlet: se fija condiciones de presiones y la dirección del flujo.
- Sym: no requiere ajustes, crea un sólido interior correspondiente al fluido.
- Wall: se fija como cuerpo estacionario.

A continuación, se han rellenado los valores de referencia que el programa utiliza para relacionar la fuerza con el coeficiente de fricción:

**Reference Values**

Area (m <sup>2</sup> )	3.29
Density (kg/m <sup>3</sup> )	998.2
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	7
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (km/h)	12
Viscosity (kg/m-s)	0.001003
Ratio of Specific Heats	1.4

Figura 55: Ejemplo de valores de referencia para una velocidad de 12 km/h (Fuente: elaboración propia)

El área mojada corresponde a la proyección del casco sumergido sobre el eje X y se obtiene del producto del calado y la manga.

Finalmente se han creado tres informes, para obtener la Fuerza en dirección X, el  $C_{Dx}$  y los residuos del método k-epsilon, y se ha inicializado (t=0) con el objetivo de dejarlo a punto para ejecutar la simulación.

### 5. Solución

Con todo a punto se ha realizado la simulación para un número de iteraciones que haga que los resultados sean coherentes. En el caso del proyecto han sido 70. Cada iteración tarda entre 1 y 0,04 segundos en realizarse con orden descendente según aumentan las iteraciones.

Para confirmar que el valor del  $C_D$  calculado no varía con la velocidad se ha realizado una simulación con diferentes velocidades y se han obtenido los siguientes resultados:

Para 12 km/h:

Zone	Forces (n)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
wall_barcaza	-6401.7007	-744.59918	-7146.2999	-0.35087601	-0.040811342	-0.39168736
Net	-6401.7007	-744.59918	-7146.2999	-0.35087601	-0.040811342	-0.39168736

Figura 56: Resultado de la simulación para una velocidad de 12 km/h (Fuente: elaboración propia)

Para 6 km/h:

Zone	Forces (n)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
wall_barcaza	-1600.5811	-211.02136	-1811.6024	-0.35091019	-0.046264165	-0.39717436
Net	-1600.5811	-211.02136	-1811.6024	-0.35091019	-0.046264165	-0.39717436

Figura 57: Resultado de la simulación para una velocidad de 6 km/h (Fuente: elaboración propia)

Para 3 km/h:

Zone	Forces (n)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
wall_barcaza	-400.80869	-60.349392	-461.15808	-0.35149198	-0.052923822	-0.4044158
Net	-400.80869	-60.349392	-461.15808	-0.35149198	-0.052923822	-0.4044158

Figura 58: Resultado de la simulación para una velocidad de 3 km/h (Fuente: elaboración propia)

Los resultados se encuentran desglosados en dos términos y en su total. Esto se debe a los dos fenómenos que impiden el movimiento del barco como se explica en el punto 4.2.3.1. El barco se ve mayormente afectado por la diferencia de presiones para todas las velocidades estudiadas ( $F_{D\_presión}$  del orden de 7 veces la  $F_{D\_fricción}$ ), pero para velocidades inferiores el coeficiente debido a la fricción gana peso y genera que aumente el total del coeficiente de fricción mientras que el coeficiente de presiones permanece prácticamente igual. Aun así, este cambio no es significativo.

Los resultados vienen acompañados de un símbolo negativo indicando que el sentido de la fuerza es contrario al del eje X.

Una vez se ha comprobado la coherencia de los resultados, se acepta y usa el valor de 12 km/h debido a que es el más próximo a la velocidad de trabajo que va a llevar el barco.

$$C_D = 0,39168736$$

## 6. Resultados

Al realizar la simulación se han analizado los resultados y se ha vigilado que estos hayan sido coherentes. Para ello se han desplegado los informes previamente construidos en la etapa de *Set up* que se representan sobre un gráfico en función del número de iteraciones.

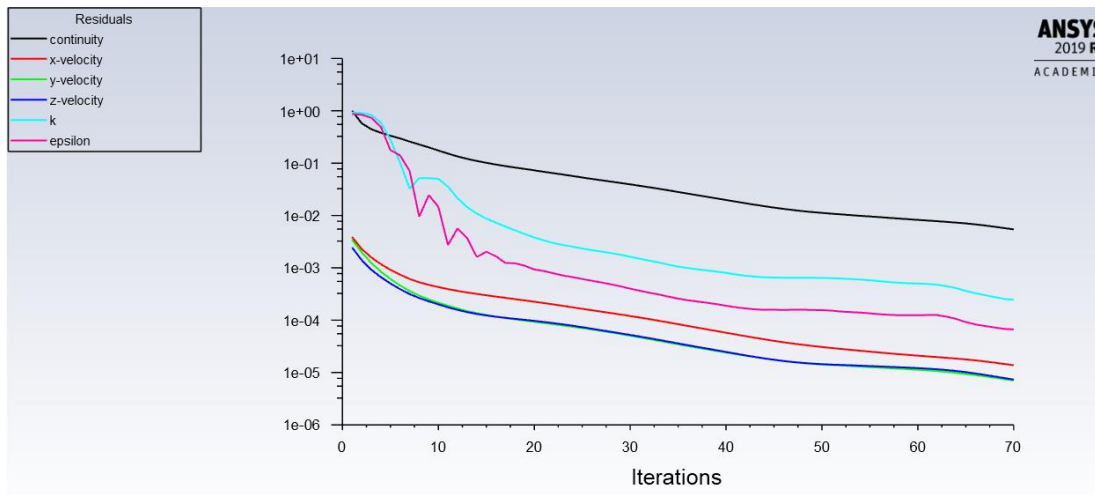


Gráfico 11: Gráfico de los residuos del método k-epsilon (Fuente: elaboración propia)

Se aprecia como las líneas que representan los residuos del método convergen y tienen magnitudes muy pequeñas.

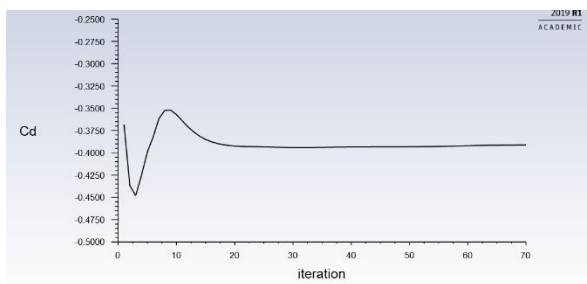
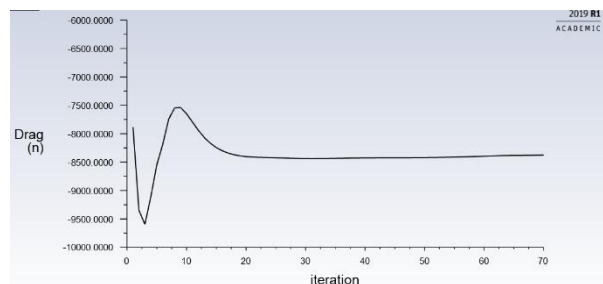


Gráfico 12: 2.1.  $C_d$  en función de la iteración (Fuente: elaboración propia)



2.2. Fuerza de arrastre en función de la iteración

Ambos gráficos representan lo mismo y se observa como a medida que aumentan las iteraciones los valores se estabilizan hasta el punto de que se mantienen constantes.

Finalmente se ha realizado una exploración gráfica donde se ha mirado principalmente las presiones que se generan sobre el barco. También la velocidad del fluido que rodea al barco.



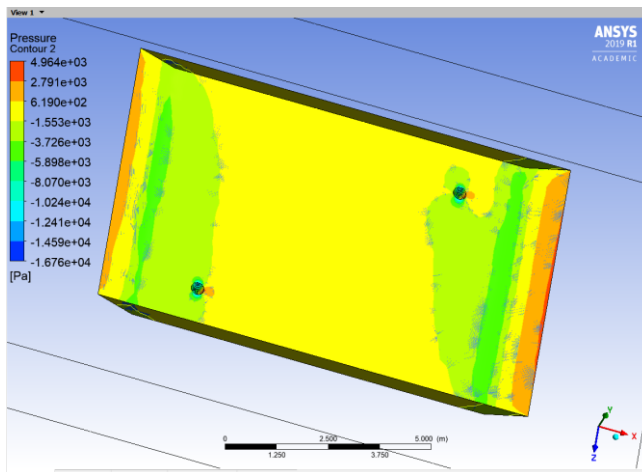


Figura 59: Presión estática sobre el barco (Fuente: elaboración propia)

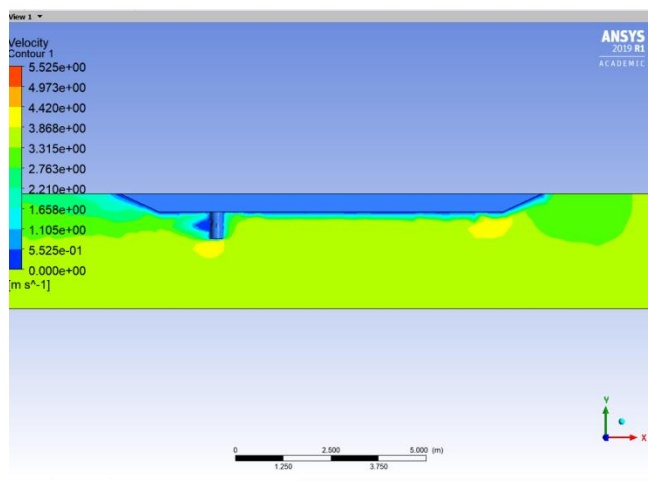


Figura 60: Velocidad del fluido sobre un lateral (Fuente: elaboración propia)

Con el estudio gráfico se ha observado el flujo a través y se ha visualizado el fenómeno que recoge la teoría de los cuerpos bajo influencia de un fluido que frena el avance de la barcaza.

### A3. Resultados simulación de geometría definitiva.

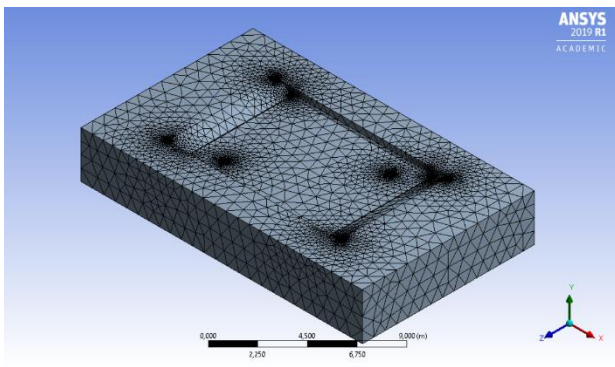


Figura 61: Mallado de la geometría (Fuente: elaboración propia)

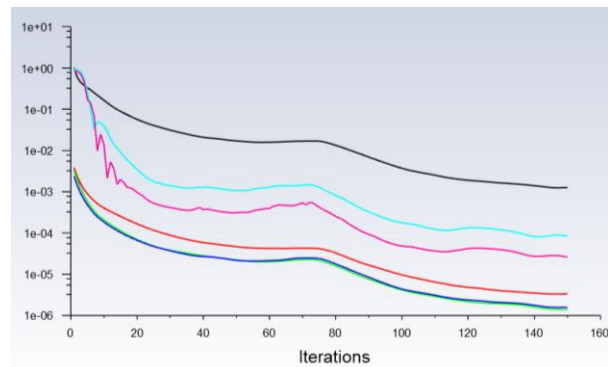


Gráfico 13: Residuos de la iteración (Fuente: elaboración propia)

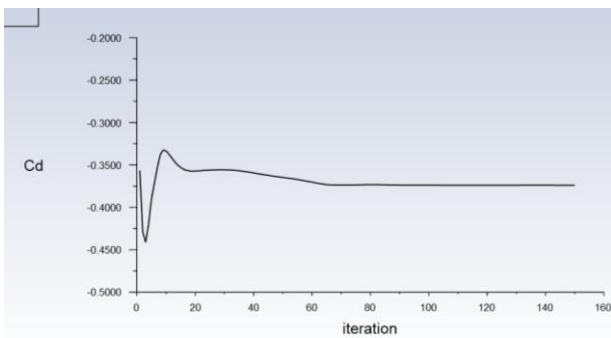


Gráfico 14: Coeficiente de drag según la iteración (Fuente: elaboración propia)

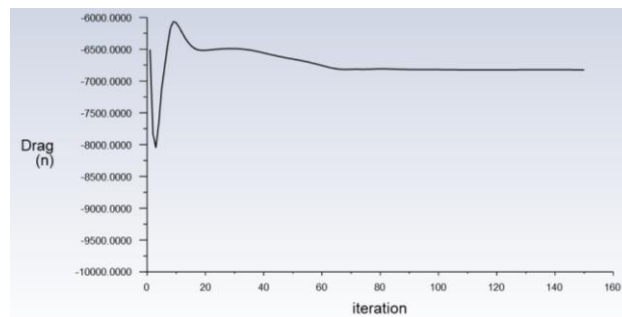


Gráfico 15: Fuerza de arrastre según la iteración (Fuente: elaboración propia)

Zone	Forces (n)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
wall_barcaza	-6132.3779	-683.22412	-6815.6021	-0.33611448	-0.037447386	-0.37356187
Net	-6132.3779	-683.22412	-6815.6021	-0.33611448	-0.037447386	-0.37356187

Tabla 9: Resultados de la simulación (Fuente: elaboración propia)

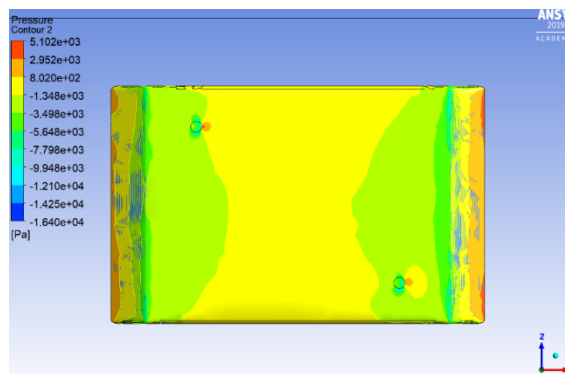


Figura 62: Presión sobre el casco del barco (Fuente: elaboración propia)

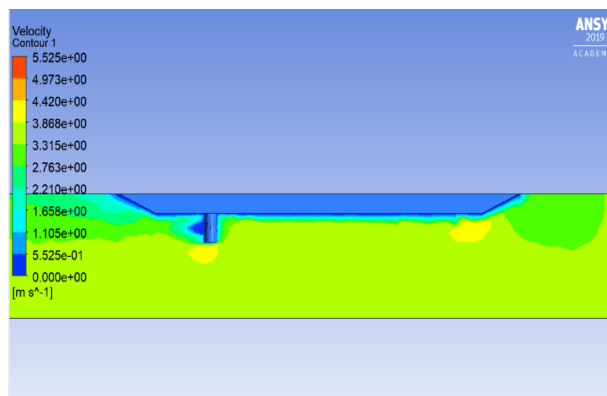


Figura 63: Presión sobre el casco del barco (Fuente: elaboración propia)

## A4. Todos los componentes de a bordo del barco

Componente	Producto	Cantidad	Precio unidad (€)	Peso total(kg)
Pantalla de a bordo	Pantalla NMEA 2000	1	450	0,7
Luces de a bordo	Lámpara LED GU5.3 MR16	12	1	4
Foco de cubierta	Campana LED Driverless PHILIPS 100W	2	70	2
Radio VHF	VHF cobra MR F77GPS	1	187	1,1
Bomba de refrigeración	Cooling pump 12V	2	24	1,2
Caja de conexiones	System Control Unit Torqeedo	2	-	14
Sistema de administración de carga	Shore charge managment system L-size	1	178	4,2
Palanca de acelerador	Twin throttle - top mounting	1	1599	3,2
Baterías	Deep Blue Battery BMW i3	2	30000	570
Sistema de propulsión	Z-drive azimuth system	2	7000	416
Batería de a bordo	Batería GEL 12V 115Ah Ultracell UCG-115-12	1		31
Cargador AC	Rowcharger 10 kW	2	751	5,7
Construcción del barco + mano de obra		1	60.000	20.000
Motor	Deep Blue 40i 1400	2	18000	176
Cargador de estación	Cargador 11,2kW Scame	2	882	-
<b>TOTAL</b>			<b>115.880</b>	<b>21.229,1</b>

A este precio cabe sumarle la construcción del barco estimada en 80.000€ contemplando barcasas similares. La barcaza tiene un precio total de 195.880€.

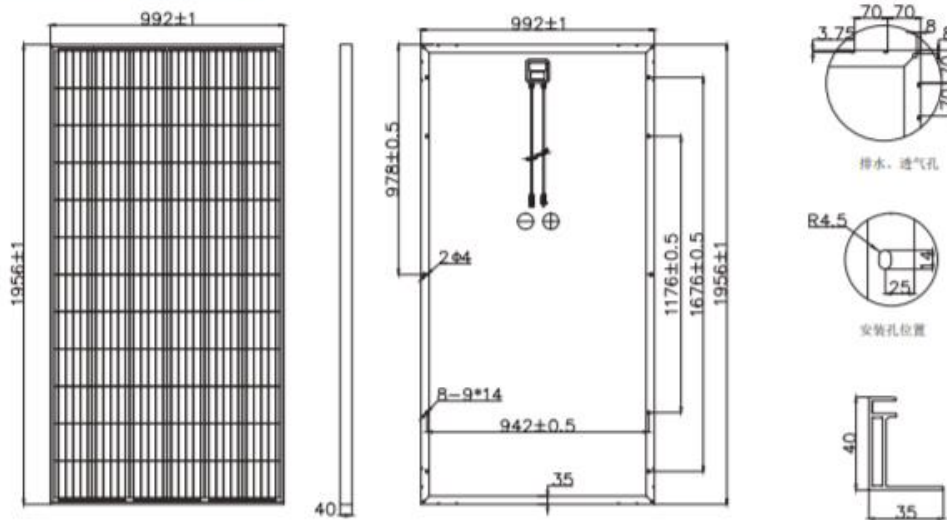
## A5. Ficha técnica del panel Solar utilizado



**ESPMC335**

### Specifications

Size of module	1956x992x40mm
Cell Type	156.75x156.75 POLY
Number of cells	72(6x12)
Maximum Power(Wp)	335W
Tolerance of Power(%)	±3%
Open circuit Voltage(Voc)	46.1V
Short circuit Current(Isc)	9.38A
Maximum Power Voltage(Vm)	38.2V
Maximum Power Current(Imp)	8.77A
Maximum Series Fuse	15A
Number of Diode	3
Cable type and Length	4mm <sup>2</sup> ,90cm
Standard Test Conditions	1000W/M <sup>2</sup> ,25 C ,AM1.5
Maximum System Voltage	1000V/DC
Temperature-Coefficient Isc	+0.08558%/ C
Temperature-Coefficient Uoc	-0.29506%/ C
Temperature-Coefficient Pmpp	-0.38001%/ C
Normal Operating Cell Temperature	45 C
Module efficiency	17.2%
Product Certificate	TUV(IEC 61215,IEC 61730),CE,ROHS
Company Certificate	ISO9001,ISO14001,ISO18001
Weight	20.9Kg



ERA SOLAR and the ERA SOLAR logo are trademarks or registered trademarks of ERA SOLAR Corporation. January 2019 ERA SOLAR Corporation. All rights reserved.Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.



Zhejiang ERA Solar Technology Co., Ltd.  
www.erasolar.com.cn



**A6. Tabla de precios según el vehículo del paso de Coria**

VEHICULO/TRANSPORTE	Precio (€)
PERSONA	0,9
BICICLETA	1,1
MOTO HASTA 80 C.C.	1,2
MOTO DE MÁS DE 80 C.C.	1,9
TRACTOR PEQUEÑO	8
TRACTOR GRANDE	9,5
TRACTOR SÚPER GRANDE ESPECIAL-HUNIMOG	12,5
TRACTOR CARRO, TRACTOR FANGUEO	40
REMOLQUES, APEROS GRANDES, TRAILLA, GRADA, ETC.	9
REMOLQUE ALGODÓN, CANASTA, TRAILLA ESPECIAL Y LASER	14,5
REMOLQUE TRAILER	22
APERO DE TRACTOR, CULTIVADOR, ARADO, ETC.	5
CARGA DE TRACTOR O CAMIÓN	7,7
CARGA DE FURGONETA	2,2
TURISMO PEQUEÑO (CLIO, 205, POLO Y SIMILARES)	2,1
TURISMO MEDIANO-TODO TERRENO CORTO O SIMILARES	2,4
FURGONETA VANETTE (Y SIMILARES), TODO TERRENO LARGO	2,8
2.40TURISMO MERCEDES, BMW, AUDI, DEPORTIVOS Y SIMILARES	2,8
FURGONETA MEDIANA Y TODO TERRENO SÚPER	3,2
CAMIÓN PEQUEÑO Y FURGÓN	5,5

CAMIÓN MEDIANO Y FURGÓN SÚPER	7,7
CAMIÓN GRANDE SIMILAR	11
CAMIÓN GRANDE O SIMILAR CON GRÚA	12,2
BATEA	6
MÁQUINA DE ALGODÓN	32
MÁQUINA RETRO PEQUEÑA	10
CABEZA DE GANADO MAYOR SIN HERRAR	4,5
REMOLQUE VAN DE CABALLO PEQUEÑO O SIMILARES	3,3
CARRITO DE COCHE	2,5
CHARRETE CON UN CABALLO	6,8
MÁQUINA COSECHADORA MEDIANA (SOLA)	30
MÁQUINA COSECHADORA SÚPER (SOLA)	36
CORTE COSECHADORA	15
MÁQUINA DE PATATAS	28
MÁQUINA EMPACADORA PEQUEÑA	10,5
MÁQUINA EMPACADORA GRANDE	28
MOTO NIVELADORA O PALA GRANDE	40
CAMIÓN DE 3 EJES	25