

Trabajo Final de Máster

Máster universitario en Ingeniería Industrial

Diseño de un dispositivo acuático por impulsión eléctrica

MEMORIA

Autor: Arnau Simón Roca
Director: Emilio Angulo Navarro
Convocatoria: Abril 2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Este proyecto contiene la realización del diseño de un dispositivo acuático impulsado mediante energía eléctrica.

Para lograrlo, se empieza por realizar un estudio de mercado de las embarcaciones de recreo susceptibles a ser electrificadas más comunes y se describen sus características. También se realiza un estudio de mercado de las embarcaciones totalmente eléctricas existentes para establecer el estado del arte actual. De estos dos estudios se concluye tomar como modelo la morfología de una moto de agua para el dispositivo acuático que se diseña.

Aunque el dispositivo diseñado se inspira en las motos de agua, su filosofía es distinta. La intención de este dispositivo eléctrico es navegar a velocidades bajas o moderadas, obteniendo una experiencia de usuario relajada y tranquila, distinta de la que promueven las motos de agua de gasolina.

Para poder establecer las especificaciones del dispositivo se realiza un estudio de la tecnología. Se pretende que el dispositivo diseñado integre componentes ya preexistentes en el mercado en sustitución a los elementos que integra una moto de agua convencional. Para poder escoger adecuadamente los elementos que conformará el dispositivo acuático eléctrico se realiza un estudio de la arquitectura y la mecánica que envuelve a las motos acuáticas. El análisis de componentes que se puedan adecuar a la experiencia de navegación deseada con el dispositivo se realiza de tres compañías de motores eléctricos: Kräutler Elektromaschinen, Torqueedo y Bellmarine.

Una vez establecidas las especificaciones se realiza tres diseños conceptuales integrando en cada uno los componentes de una sola de las compañías analizadas en el estudio de la tecnología. Se plantean dos diseños con componentes de la compañía Torqueedo y uno con componentes de la compañía Bellmarine. La compañía Kräutler Elektromaschinen será descartada. Para realizar estos diseños se decide antes las dimensiones principales que tendrá el dispositivo, incluyendo un cálculo sobre la flotabilidad prevista y la potencia necesaria para cumplir con la velocidad máxima deseada utilizando tres métodos de predicción distintos: una relación entre las potencias y las velocidades, el método de Savitsky y una simulación con el complemento Fluent del software ANSYS.

A continuación, se realiza el diseño detallado del dispositivo acuático eléctrico, aunque no se llegan a realizar planos ni se acaban sus componentes hasta la última cota. De este diseño salen dos versiones: una primera variante y el diseño final.

Finalmente se realiza unos cálculos de comprobación de la flotabilidad, la estabilidad y la deformación estructural del diseño final.

Sumario

| | |
|---|-----------|
| SUMARIO | 5 |
| 1 GLOSARIO | 7 |
| 2 INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2.1 Objetivos del proyecto | 9 |
| 2.2 Alcance del proyecto | 10 |
| 2.3 Justificación | 11 |
| 2.3.1 Justificación industrial | 11 |
| 2.3.2 Justificación personal | 12 |
| 3 ESTADO DEL ARTE | 13 |
| 3.1 Estudio de mercado | 13 |
| 3.1.1 Embarcaciones de motor de combustión | 13 |
| 3.1.2 Embarcaciones eléctricas | 16 |
| 3.1.3 Conclusiones del estudio de mercado | 19 |
| 3.2 Estudio de la tecnología | 20 |
| 3.2.1 Conceptos útiles | 20 |
| 3.2.2 Arquitectura de la moto de agua convencional | 24 |
| 3.2.3 Compañías de suministros | 32 |
| 4 ESPECIFICACIONES | 39 |
| 5 DISEÑO CONCEPTUAL | 41 |
| 5.1 Dimensiones principales | 41 |
| 5.2 Predicción de la potencia propulsiva | 42 |
| 5.2.1 Conclusiones de la predicción de potencias | 51 |
| 5.3 Diseño conceptual | 51 |
| 5.3.1 Diseños con la compañía Torqueedo | 52 |
| 5.3.2 Diseño con la compañía Bellmarine | 55 |
| 6 DISEÑO DETALLADO | 57 |
| 6.1 Variante del diseño final | 57 |
| 6.2 Diseño final del dispositivo acuático eléctrico | 59 |
| 7 COMPROBACIONES FINALES | 72 |
| 7.1.1 Flotabilidad | 72 |
| 7.1.2 Estabilidad | 75 |
| 7.1.3 Deformación estructural | 77 |

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 8 | IMPACTO AMBIENTAL | 80 |
| 9 | PRESUPUESTO DEL PROYECTO | 81 |
| 9.1 | Presupuesto del prototipo | 81 |
| 9.2 | Costes de ingeniería | 82 |
| | CONCLUSIONES | 85 |
| | AGRADECIMIENTOS | 87 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 88 |
| | Referencias bibliográficas | 88 |
| | Bibliografía complementaria | 90 |

1 Glosario

En este glosario se presentan los términos marinos que se utilizan en el proyecto.

Partes de un buque

Proa: Parte delantera de la embarcación.

Popa: Parte trasera de la embarcación.

Babor: Lado izquierdo de la embarcación mirando de popa a proa.

Estribor: Lado derecho de la embarcación mirando de popa a proa.

Quilla: Pieza que corre de proa a popa a lo largo de la línea media más baja del buque, siendo el principal refuerzo longitudinal.

Cubierta: Cada uno de los pisos o suelos de la embarcación.

Roda: Pieza que prolonga la quilla, empalmándose a ésta en dirección vertical o inclinada hasta la cubierta, rematando el casco por la proa.

Codaste: Pieza estructural que prolonga la quilla por la popa.

Medidas y ángulos

Eslora: Longitud de una embarcación.

Manga: Ancho máximo del barco.

Calado: Amplitud vertical de la parte sumergida del buque, distancia entre la parte más baja del barco y la línea de flotación.

Línea de flotación: Es la línea que determina el agua en la parte exterior del casco, separando la obra viva de la obra muerta.

Obra viva: Parte del casco sumergida, comprendida desde la quilla hasta la línea de flotación.

Obra muerta: Es la parte del casco que sobresale de la superficie del agua.

Astilla muerta: Ángulo que forma un lateral del casco con la unión en la quilla.

2 Introducció

En el sector naval, la contaminació por las emisiones resultantes del uso de los combustibles fósiles ha tardado en ser foco de atención. Esto ha sido por la falta de una regulación generalizada que estableciese un nivel de emisiones máximo. Las pocas regulaciones existentes eran muy limitadas y locales, como en algunos lagos de Alemania o en los canales centrales de Ámsterdam.

No ha sido hasta el pasado año 2020 que, por normativa, se ha establecido reducir el nivel de emisiones de algunos contaminantes que afectan a la atmósfera, como los óxidos de azufre (SOx) y los óxidos nitrosos (NOx). En el sector marítimo, en concreto, se debe reducir el azufre de sus combustibles del 3,5% al 0,5%, en masa de combustible.

Para lograr cumplir con la normativa de la limitación de emisiones vigente, el sector marítimo debe optar por una mezcla de soluciones, entre las cuales se incluye la electrificación parcial de las grandes embarcaciones mediante el uso de baterías. [1]

Bajo este escenario, el presente proyecto plantea el diseño de un dispositivo eléctrico con el ánimo de fomentar las embarcaciones eléctricas.

2.1 Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un dispositivo acuático impulsado mediante energía eléctrica que proporcione una experiencia de navegación tranquila y relajada. El dispositivo final se asemejará a la forma de una moto de agua de gasolina, sustituyendo los componentes necesarios de ésta para que su impulsión sea eléctrica. Con el fin de lograr este objetivo, el proyecto quiere cumplir con los objetivos específicos siguientes:

- Tomar la decisión de qué tipo de embarcación es más adecuada para electrificar.
- Aprender sobre la mecánica del tipo de embarcación escogida.
- Realizar un estudio sobre diferentes compañías que ofrezcan soluciones eléctricas marinas.
- Crear un documento de especificaciones.
- Utilizar programas de diseño CAD 3D para desarrollar posibles modelos que cumplan con las especificaciones deseadas.
- Estudiar métodos y cálculos que se apliquen en el diseño de embarcaciones.
- Utilizar programas de simulación de fluidos.
- Desarrollar un diseño del dispositivo eléctrico.

2.2 Alcance del proyecto

Para llegar a realizar un diseño en detalle de un dispositivo acuático se requiere de un amplio conocimiento y experiencia en el sector, experiencia que el autor de este proyecto no tiene y no puede alcanzar totalmente en el transcurso de este proyecto. Es por eso que el diseño final del dispositivo queda a medio camino entre un diseño conceptual y un diseño detallado. El diseño del dispositivo eléctrico que se presenta en este proyecto no acaba las piezas que lo componen hasta la última cota, no contiene planos de sus elementos y tampoco realiza una simulación de la autonomía que tendría el dispositivo.

El alcance de este proyecto contiene:

- Un estudio de mercado de las embarcaciones de recreo con motor de combustión.
- Un estudio de mercado de las embarcaciones eléctricas.
- La toma de decisión de la morfología que tendrá el dispositivo acuático eléctrico.
- El estudio de la arquitectura y elementos que presenta una moto de agua de gasolina.
- Una explicación de los conceptos que se han considerado interesantes conocer para el diseño del dispositivo.
- Un estudio de compañías de soluciones eléctricas marinas y la búsqueda de los componentes eléctricos que integrar en el diseño que ofrece cada una de ellas.
- La redacción de un documento de especificaciones para el diseño.
- La toma de decisión de las dimensiones generales que tendrá el dispositivo y una estimación de su flotabilidad.
- La aplicación de tres métodos para la predicción de la potencia que necesitará el dispositivo.
- La descripción de tres diseños conceptuales realizados que integran los componentes eléctricos de las compañías estudiadas anteriormente y la elección de uno de ellos para su desarrollo.
- El desarrollo del diseño conceptual escogido a medio camino del diseño detallado y su descripción.
- La realización de cálculos para la comprobación de la flotabilidad, la estabilidad y la deformación del casco sobre el diseño final.
- El impacto ambiental del dispositivo diseñado
- Un estudio económico aproximado.

2.3 Justificación

2.3.1 Justificación industrial

Las embarcaciones eléctricas comportan múltiples ventajas respecto a las de motor por combustión, lo que las hace muy atractivas para la industria naval.

En primer lugar, resultan muy beneficiosas para el medio ambiente. Sus motores se alimentan de energía eléctrica, que es más sostenible con el medio ambiente, y no dejan residuos a su paso.

Tampoco producen apenas ruido, vibraciones u olores, si son comparados con los motores de combustión. Esto es muy agradecido tanto para el entorno, como puede ser la fauna que nos rodee o las personas que se encuentren alrededor, como para los propios tripulantes de la embarcación, pues las vibraciones y el ruido constante es de las cosas que más molestan al navegar a motor.

En segundo lugar, el mantenimiento del motor eléctrico es más sencillo que el mantenimiento de un motor de combustión al tener un mecanismo más simple y contar con una mayor fiabilidad.

En tercer lugar, económicamente supone un ahorro de combustible que se hará notable a largo plazo. La energía eléctrica es más barata que la gasolina o el gasoil.

Cabe mencionar la posibilidad de obtener la energía eléctrica directamente del entorno, siendo de este modo 100% sostenible, a través de placas solares situadas en la embarcación o de hélices hidro generadoras, que aprovechan el avance de la embarcación para generar energía eléctrica consiguiendo un ahorro aún mayor.

Por estas razones entre otras, las embarcaciones eléctricas e híbridas están en auge. Anualmente salen nuevos dispositivos acuáticos en los salones náuticos, híbridos o eléctricos, que atraen la mirada de las grandes compañías.

Dentro de estas embarcaciones eléctricas e híbridas, existen pocos modelos de motos de agua que sean totalmente eléctricos. Esto supone un mercado amplio en el que encajar el dispositivo que se pretende diseñar.

Por contrapartida, aún presentar notables ventajas, también presentan ciertas desventajas generales. Las más destacables vienen dadas por el uso de las baterías.

Actualmente, existen pocos puertos que permiten cargar embarcaciones eléctricas, con lo que el navegante no puede tener seguridad de una recarga en puerto si existe una emergencia.

El notable peso de sus baterías supone un esfuerzo adicional si es necesario desplazarlas o sacarlas de la embarcación hasta una estación de carga para recargarlas.

La recarga de las baterías requiere de un tiempo mayor comparado al que se tarda en repostar el depósito de un motor de gasolina.

Finalmente, presentan una menor autonomía, en términos generales, que las embarcaciones de motor de combustión dada la energía que necesitan y la tecnología de baterías existente.

2.3.2 Justificación personal

La navegación siempre ha llamado la atención del autor de este proyecto. Es una de las primeras grandes conquistas de la especie humana y requirió de conocimientos científicos y tecnológicos para perfeccionarse. Tanto la física como la oceanografía o la cartografía entran en juego cuando se usa una embarcación para desplazarse de un punto a otro. Desde sus inicios, el sector naval desarrolló unas leyes y valores propios que aún inspiran respeto al escritor de estas líneas, por todo esto, el tener la oportunidad de realizar un proyecto en el que se diseñase un dispositivo acuático, supuso un gran atractivo para él.

Otra de las motivaciones personales del autor es la de poder aunar varias de las áreas de estudio que ha realizado durante su periodo educacional y poner a prueba los conocimientos que ha adquirido a lo largo del tiempo, aplicándolos a un sector que, aun atrayéndole desde hace tiempo, nunca había tratado desde un punto de vista ingenieril.

También estaba en su mente el conocer de primera mano como se inicia un proyecto de características notables como es el que se presenta en estas páginas. Quería tener la experiencia de desarrollar el diseño de un producto desde cero para conocer las fases por las que se debe pasar, que tipo de información se debe buscar, o que herramientas se pueden utilizar, entre otras cosas. Quería realizar un proceso de aprendizaje que en un futuro le proporcionase cierto bagaje para poder plantearse si el diseño de producto puede seguir atrayéndole.

Finalmente, la ingeniería le parece al autor de este proyecto, una herramienta que puede aplicarse al desarrollo de nuevas soluciones y continuar guiando el avance de la humanidad superando nuevos retos como ya hizo con la conquista del mar y la navegación. Por eso, el tratar de reinventar dispositivos que vayan a influir en cierto modo a una mejora del entorno en el que vivimos, como es el caso de este dispositivo, ha sido la última motivación para él.

3 Estado del arte

En este apartado se presenta un estudio de mercado con el fin de escoger una embarcación modelo sobre la que basar el diseño y un estudio de la tecnología sobre la embarcación modelo que se ha escogido.

3.1 Estudio de mercado

A continuación, se realiza un estudio de los distintos tipos de embarcaciones de recreo a motor que se han considerado susceptibles de ser electrificadas y un estudio de mercado de embarcaciones eléctricas destacables por su innovación. El fin es conocer cuál es el estado del arte de las embarcaciones eléctricas en la actualidad y escoger uno de los tipos de embarcaciones que se presentan como referencia morfológica y técnica para el diseño del dispositivo acuático eléctrico.

3.1.1 Embarcaciones de motor de combustión

En este subapartado se presentan las embarcaciones con motor de combustión que se han considerado interesantes y se pueden encontrar en el mercado.

- Bowrider

Las embarcaciones bowrider son muy populares. Disponen de espacio y asientos en toda su cubierta con capacidad para, habitualmente, ocho personas. La característica principal de este tipo de embarcaciones es que su proa (parte delantera de la embarcación) está específicamente diseñada para poder acomodar pasajeros. [2]



Figura 1. Bowrider (Fuente: cosasdebarcos.com).

- Semirrígidas

Las semirrígidas son embarcaciones formadas por un casco rígido y flotadores hinchables. Pueden disponer de motores fueraborda (completamente externos a la estructura de la embarcación) o intraborda (situados dentro de la embarcación).

En sus orígenes, dada su practicidad, eran utilizadas como botes para usos profesionales, como trabajos de carga y descarga de mercancías o trabajos de salvamento. Actualmente han ganado popularidad como embarcaciones de recreo por su coste y su gran versatilidad. [3]



Figura 2. Semirrígida (Fuente: lejenmarine.com).

- Lanchas con cabina

Son embarcaciones con cabina para sus pasajeros. Estas lanchas están habitualmente pensadas para acomodar a dos personas. La distribución más común de este tipo de embarcaciones consiste en una cubierta (piso superior de la embarcación) espaciosa y una proa cerrada, en la que se sitúa la cabina. [2]



Figura 3. Lancha con cabina (Fuente: marineinsight.com).

- Barcos pesqueros de recreo

Los barcos pesqueros, pese a su tamaño, disponen de unas características que los convierten en buenas embarcaciones para ser usadas con fines recreacionales.

Las características que lo convierten en una buena opción para el ocio, notables en la Figura 4, son: una manga (anchura máxima del barco) amplia, que proporciona buena estabilidad, una proa elevada para protegerse del oleaje y una popa (parte trasera de la embarcación) con gran flotabilidad para una navegación confortable a bajas velocidades. [3]



Figura 4. Barco pesquero de recreo (Fuente: marinos.es).

- Catamarán a motor

Los catamaranes son embarcaciones multicasco. A diferencia de otras embarcaciones, el catamarán está constituido por dos cascos paralelos del mismo tamaño que permite que la embarcación reduzca su calado (distancia vertical sumergida del casco) y tenga mayor estabilidad, así como un mejor desplazamiento en el agua. Su mayor estabilidad hace que sea sencillo de controlar. Esto convierte a los catamaranes excelentes embarcaciones para actividades de ocio como la pesca. [2]



Figura 5. Catamarán a motor (Fuente: leopardcatamarans.com).

- Jet ski

El Jet ski es un dispositivo acuático monoplaza de tamaño reducido, diseñado para que su piloto navegue de pie. Su uso requiere de cierta práctica.

Por su flotabilidad, el usuario no puede permanecer encima si está detenido, dado que el jet ski se hunde parcialmente. Su manejo es complejo, aunque ágil, es muy inestable y en su navegación el piloto tiene que conseguir equilibrarse según va acelerando.



Figura 6. Proceso para levantarse en un Jet ski y navegación en jet ski
(Fuentes: youtube.com, pesonalwatercraft.com).

- Moto de agua

Dispositivo muy popular diseñado para actividades de aventura. Permite a su usuario alcanzar lugares que no podrían ser alcanzados por otras embarcaciones gracias a su gran manejabilidad y escaso calado. A parte de su uso recreacional, también es utilizado en ocasiones como vehículo utilitario para tareas profesionales de salvamento.

Sus características principales son que se maneja sentado y que tiene capacidad para llevar pasajeros, es multiplaza. Existen motos acuáticas biplaza, triplaza y hasta cuatriplaza. [2]



Figura 7. Moto de agua biplaza (Fuente: ocio.uncomo.com).

3.1.2 Embarcaciones eléctricas

En este subapartado se realiza un estudio de mercado de las embarcaciones eléctricas existentes que se han considerado interesantes. Se han buscado aquellas que presentan suficiente innovación para situarse en la vanguardia de este tipo de embarcaciones.

- Q30

La embarcación Q30 de la empresa Q-Yachts es una embarcación totalmente eléctrica que entra en la clasificación de lancha con cabina. Diseñada para una experiencia de navegación relajada y silenciosa cuenta con una cabina amplia y una cubierta preparada para el ocio. [4]



Figura 8. Embarcación Q30 e interior de su cabina (Fuente: Q-Yachts Brochure).

- SAY 29E

El SAY 29E, de la compañía SAY Carbon, es un barco eléctrico con un diseño deportivo que ostenta hoy en día el récord mundial de velocidad, alcanzando una velocidad máxima de 96km/h. [5]



Figura 9. embarcación Say 29E (Fuente: youtube.com).

- Aquanima 40

La embarcación Aquanima 40 es un catamarán eléctrico creado por la empresa Azura Marine. Su banco de baterías se carga mediante paneles solares incorporados en la misma embarcación, esto supone que no necesita acercarse a ningún punto de carga para repostar energía en sus viajes. Está diseñado para una navegación lenta y cuenta con espacio para alojar a ocho pasajeros. [6]



Figura 10. Catamarán Aquanima 40 (Fuente: azura-marine.com).

- Eelex 8000

La Eelex 8000 es una embarcación eléctrica de la compañía X Shore que permite varias actividades ociosas y sociales como deportes acuáticos, la pesca, o reuniones con amigos o familiares. Además, tiene un enfoque sostenible en la elección de los materiales que la conforman. Como ejemplo, su casco está fabricado de tela de lino y PET reciclado. [7]



Figura 11. Embarcación Eelex 8000 (Fuente: Eelex 8000 Brochure).

- Candela Seven

El Candela Seven es una embarcación eléctrica innovadora construida totalmente en fibra de carbono. Su característica principal es que al navegar lo hace por encima de las olas gracias a los hidroplaneadores que lleva incorporados. Esto reduce su consumo energético y evita el cabeceo con las olas haciendo muy estable su navegación. [8]



Figura 12. Embarcación Candela Seven (Fuente: Candelasevenspeedboat.com).

- Narke GT 95

La Narke GT 95 es una de las pocas motos acuáticas totalmente eléctricas fabricadas en serie en la actualidad. Diseñada para ser un vehículo acuático de lujo con dimensiones por encima de la media. [9]



Figura 13. Narke GT 95 (Fuente: Narke Brochure).

- Gliss Speed

El Gliss Speed es el primer kart náutico eléctrico, un dispositivo acuático de reducidas dimensiones que está diseñado para el ocio y la navegación controlada en aguas muy calmadas o circuitos preparados para ello.



Figura 14. Kart acuático Gliss Speed (Fuente: gliss-speed.com).

3.1.3 Conclusiones del estudio de mercado

Tras realizar el estudio de mercado de las embarcaciones de motor de combustión y el estudio de mercado de las embarcaciones eléctricas, se ha llegado a la conclusión de que en la actualidad la oferta de embarcaciones eléctricas no es demasiado amplia, aunque existe un auge en el lanzamiento de modelos eléctricos y cada vez son más las novedades al respecto.

Se ha podido observar que la mayoría de embarcaciones puramente eléctricas del mercado están orientadas al sector del recreo. También se ha visto que tienden a innovar enfocando sus diseños hacia la sostenibilidad.

Tras analizar el mercado, se ha decidido tomar como modelo de embarcación una moto de agua. Esto es debido a que son dispositivos prácticos, de los que se han encontrado pocos

modelos eléctricos (a parte de la Narke, solo se ha encontrado la Taiga Orca, que será lanzada este año 2021) y cuentan con una facilidad de manejo apta para cualquier persona. También se ha considerado que son un tipo de embarcación compacta en la que sus elementos mecánicos quedan protegidos en su interior.

De este modo, se prevé realizar el diseño de un dispositivo acuático semejante a una moto de agua, pero con una experiencia de uso distinta a la de las motos acuáticas de motor de combustión. Se parte de la filosofía que envuelve a las embarcaciones eléctricas, en la que la forma de navegar es más respetuosa con el entorno que la rodea, para buscar que la experiencia de uso del dispositivo a diseñar sea relajada y tranquila, sin alcanzar velocidades elevadas ni buscar emociones fuertes, en contraposición a la experiencia de navegación que ofrece una moto de agua de gasolina.

Con la intención de cumplir con la filosofía de una navegación calmada, se pretende utilizar la morfología de una moto de agua de gasolina, sustituyendo sus elementos por elementos comerciales preexistentes, adecuados al tipo de experiencia relajada que se quiere conseguir.

3.2 Estudio de la tecnología

Para poder escoger los elementos comerciales adecuados al dispositivo acuático que se diseña, en este apartado se estudia la arquitectura de una moto de agua a gasolina, pero antes, se exponen algunos conceptos útiles que ayudarán a orientar el diseño.

3.2.1 Conceptos útiles

A continuación, se exponen tres conceptos considerados interesantes para comprender ciertos aspectos del diseño de las motos de agua: las condiciones del agua, los modos de navegación y los factores del comportamiento de una moto de agua en su navegación.

Condiciones del agua

Existen dos tipos de condiciones en el agua a las que debe hacer frente una moto de agua en su navegación: las aguas tranquilas y las aguas turbulentas.

- Aguas tranquilas

Son aquellas en las que el oleaje no es fuerte. Las olas no superan el metro de altura desde la cresta a su base y cuentan con un patrón de paso constante y predecible. Cuando hay oleaje en condiciones de aguas tranquilas normalmente es debido al viento o al paso de grandes o numerosas embarcaciones que lo provocan en su avance. Es el estado habitual en el que encontramos el mar o los pantanos.

- Aguas turbulentas

En las aguas turbulentas, las olas suelen ser debidas a condiciones meteorológicas adversas. En esta situación el oleaje se considera errático y sin un patrón claro. Las olas superan el metro de altura, aunque también se puede considerar que las aguas son turbulentas si las olas son lo suficiente extensas o si generan fuertes corrientes al romper. [10]

Tras conocer las dos condiciones en las que se puede encontrar el agua, se decide que el diseño del dispositivo acuático se orientará hacia la navegación en condiciones de aguas tranquilas. Esto influirá más adelante en la selección de los componentes del mercado que se integrarán en el diseño.

Modos de navegación

Dado el teorema de Arquímedes, que anuncia: “Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado”, se conoce que la flotación de una embarcación es debida a la fuerza hidrostática o de empuje, ejercida sobre el casco por el fluido. Cuando la velocidad de la embarcación es nula, esta fuerza hidrostática es igual al peso del volumen de agua desalojada por la embarcación. En cambio, cuando el cuerpo de la embarcación empieza a moverse, su casco transmite fuerza a las partículas de agua que tiene alrededor haciendo que estas entren en movimiento. Esta misma fuerza se aplica al casco en sentido opuesto. A esta fuerza se la conoce como presión hidrodinámica. A altas velocidades, esta presión hidrodinámica, actuando en dirección vertical, puede llegar a ser mayor que la fuerza de empuje sobre el barco, con lo que consigue que el casco se pueda elevar en mayor o menor medida, creando los diferentes modos de navegación.

En la Figura 15 se representan varias de las fuerzas resultantes de una placa plana y de un casco con forma de V al coger velocidad sobre el agua, entre ellas la fuerza hidrodinámica, la hidrostática o de empuje y la vertical que eleva el casco (Lift force). [11]

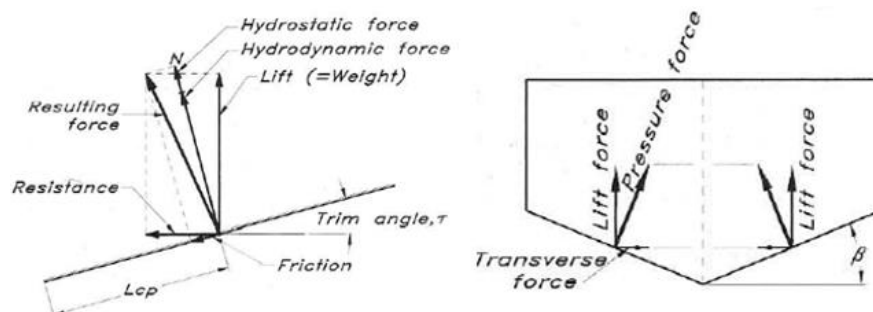


Figura 15. Fuerzas resultantes sobre un casco en navegación (Fuente: Principles of Yacht Designs).

Para delimitar la frontera entre cada modo de navegación se utiliza el número de Froude, número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido. Para su cálculo se utiliza la eslora de la embarcación (L) y la velocidad de avance de la embarcación (v).

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{g * L}}$$

Ecuación 1. Número de Froude.

En términos generales, existen tres regímenes de navegación posibles: el régimen de desplazamiento, el régimen de semidesplazamiento y el régimen de planeo.

- Régimen de desplazamiento

El régimen de desplazamiento se da cuando la velocidad de la embarcación hace que el número de Froude esté comprendido entre 0 y 0,6. La fuerza de sustentación hidrodinámica es baja.

- Régimen de semidesplazamiento

El régimen de semidesplazamiento se da cuando la velocidad de la embarcación hace que el número de Froude esté comprendido entre 0,6 y 1,3. La fuerza de sustentación hidrodinámica tiene cierto efecto en la embarcación y hace que el punto de gravedad recupere su posición inicial.

Entre el régimen de semidesplazamiento y el régimen de planeo existe la condición de pre-planeo. En esta condición, previa al planeo, el centro de gravedad empieza a tomar valores positivos, dado que las fuerzas hidrodinámicas cobran importancia en relación a la fuerza hidrostática. El área del casco en contacto con el agua empieza a disminuir.

- Régimen de planeo

El régimen de planeo, se da cuando la velocidad de la embarcación hace que el número de Froude sea mayor a 1,3. El centro de gravedad se sitúa en valores positivos. Cuando la fuerza de sustentación hidrodinámica es igual al peso de la embarcación se alcanza el planeo total, la embarcación se desliza sobre el agua.

En el siguiente gráfico, mostrado en la Figura 16, se puede observar cómo varía la fracción de la elevación de una placa plana debido a las fuerzas hidrodinámicas, así como el momento de la elevación del centro de gravedad, en relación al número de Froude. [11]

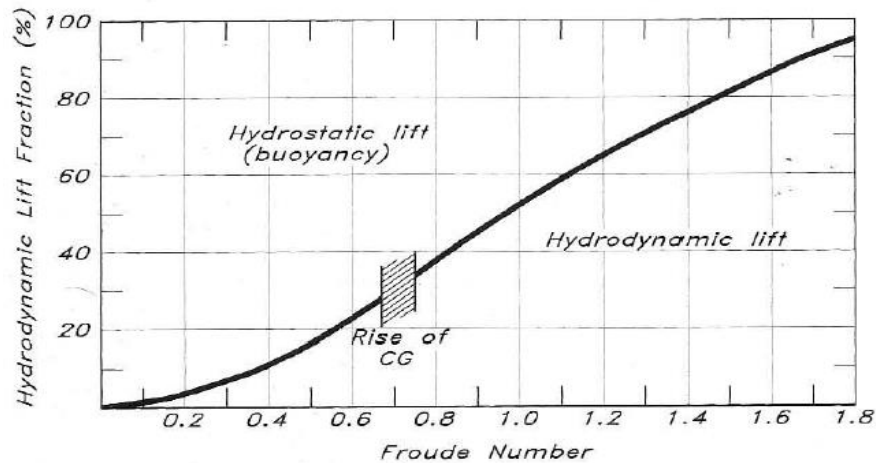


Figura 16. Gráfico de la fracción de elevación hidrodinámica respecto al número de Froude
(Fuente: Principles of Yacht Designs).

Una vez conocidos los modos de navegación, se prevé que el casco diseñado permita que el dispositivo navegue en un régimen de navegación de desplazamiento y que pueda llegar a navegar en un régimen de semidesplazamiento o de preplaneo en ciertas ocasiones.

Comportamiento de una moto

Existen tres conceptos que definen cómo es el comportamiento de una moto en el agua. Estos tres conceptos, aplicables también a otras embarcaciones, son: el tracking, la maniobrabilidad y el confort.

- Tracking

El tracking es la capacidad de la moto de agua para mantener un rumbo recto a través de las olas o corrientes a las que está expuesta, sin la necesidad de rectificar constantemente su dirección con el manillar.

- Maniobrabilidad

La maniobrabilidad es la facilidad que una moto de agua presenta a cambiar de dirección en un espacio reducido o la rapidez con la que es capaz de girar sin poner en riesgo su estabilidad.

- Confort

El confort hace referencia a la comodidad con la que el piloto maneja la moto de agua. [10]

En el momento del diseño del dispositivo, se tendrán en cuenta estos tres conceptos para conseguir un comportamiento de la moto correcto y una experiencia placentera para su usuario.

3.2.2 Arquitectura de la moto de agua convencional

Seguidamente se expone un estudio sobre el origen y la arquitectura de una moto acuática para conocer sus componentes y encontrar los elementos más adecuados en el mercado que puedan aplicarse al diseño del dispositivo eléctrico.

La moto de agua, también conocida como moto acuática o moto náutica, es un tipo de embarcación ligera cuyo manejo es muy parecido al de una motocicleta. De este hecho es de donde le viene el nombre de moto acuática.

La principal diferencia entre las motos de agua y otro tipo de embarcaciones a motor es que la moto acuática utiliza un modo de impulsión distinto. Avanza mediante la propulsión por turbina. A este sistema de impulsión y dirección se le conoce por el nombre de Jet drive, mostrado en la Figura 17. En esencia, el mecanismo contiene una pequeña bomba conectada a una turbina, que absorbe el agua por una rejilla situada en la parte inferior del casco y la propulsa a gran velocidad a través de una tobera direccionable por la popa.

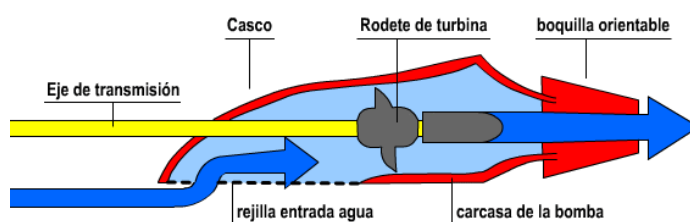


Figura 17. Esquema simple de un Jet drive (Fuente: deportesacuaticos.info).

Este tipo de propulsión permite una gran maniobrabilidad y es utilizado por embarcaciones veloces y ágiles.

Clayton J. Jacobson, es a quien generalmente se le acredita ser el inventor de la considerada primera moto acuática moderna. Pese a existir patentes precursoras de dispositivos similares, su patente, en el año 1969, es considerada la primera moto de agua (Figura 18). Esta patente de vehículo acuático impulsado por energía, de Jacobson, contiene todos los componentes clave que utilizan las motos de agua modernas. [12]

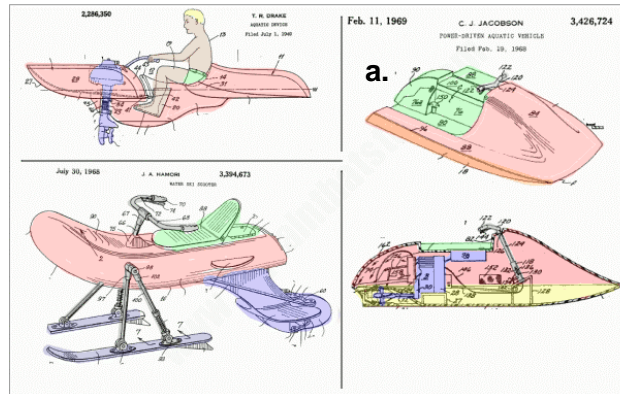


Figura 18. Patentes de vehículos acuáticos. a) Pertenciente a la patente de Jacobson (Fuente: explainthatstuff.com).

Para describir los componentes que conforman a la moto de agua moderna, se ha separado la moto en tres subgrupos: el subgrupo casco y carrocería, el subgrupo sistema de impulsión y el subgrupo sistema de dirección.

Casco y carrocería

En cualquier embarcación, tanto el casco como la carrocería son elementos importantes. Al desplazarse en el agua, su manejabilidad, su estabilidad o el confort para el usuario dependen en gran medida de estos dos elementos.

A continuación, se estudian el casco y la carrocería con más detenimiento.

El casco es el armazón o estructura externa de un barco. Trasladando esta definición a la moto de agua, se considera que el casco es su mitad externa inferior, parte diseñada para deslizarse por el agua.

Según su forma, existen tres tipos de cascos básicos sobre los que se trabaja: los cascos planos, los cascos redondos y los cascos en forma de V. Cabe mencionar, que también existen los denominados multicascos, como los ya mostrados en los catamaranes del apartado 3.1, pero estos no se emplean en las motos que encontramos en el mercado, por lo que no se tienen en cuenta en esta sección.

Cada uno de los tres cascos que se estudian, presentan diferentes cualidades explicadas a continuación.

- Cascos planos

Cascos sin apenas ángulo de astilla muerta (ángulo de inclinación del casco en su parte inferior con la vertical). Son muy estables, buenos para tareas calmadas en aguas de interior o tranquilas, pero en aguas turbulentas son los más complicados de controlar.

- Cascos redondos

Son cascos de desplazamiento, diseñados para moverse suavemente por el agua con poco esfuerzo, por ejemplo, los que utilizan las canoas o los kayaks. Son menos estables y más propensos al vuelco.

- Cascos en forma de V

El opuesto al casco plano. Son cascos con un gran ángulo de astilla muerta desde su proa a su popa. Esto propicia una navegación suave a través de aguas turbulentas dado que cortan las olas y evitan el cabeceo. A velocidades bajas tienden a la inestabilidad.

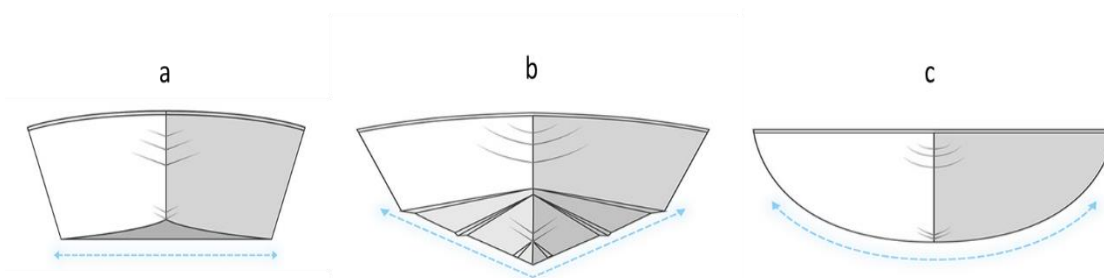


Figura 19. a) Casco plano, b) Casco en forma de V, c) Casco redondo (Fuente: waterfront-properties.com).

En la actualidad, se combinan las características de cada uno de estos tipos de casco para obtener nuevos cascos que presenten las ventajas de cada uno de ellos unificadas. Partiendo de un casco en forma de V se crea un casco de semiplano.

- Casco de semiplano

Combina las ventajas de los cascos mencionados anteriormente, partiendo del casco en forma de V. Su diseño presenta buen ángulo de astilla muerta en la proa, dándole esa forma de V, que se va suavizando y aplanando hacia la mitad de la embarcación para terminar siendo un casco prácticamente plano en la popa.

Al alterar los ángulos de la moto para crear los cascos de semiplano, se altera notablemente el comportamiento de la moto. Cuanto más tiende el casco a ser plano, la moto más rápido planea, pero por contrapartida, es más complicado mantener un rumbo fijo en cuanto a manejabilidad se refiere y menos confort proporciona para el conductor al chocar más agresivamente con las olas. Cuanto más tiende a un ángulo en forma de V, más confort proporciona, pero menos estabilidad consigue.

De esta manera, el ángulo de astilla muerta del casco se usa para unificar las ventajas que se desean, pero las aristas de este también son influyentes. [13]

- Aristas del casco

En el diseño del lomo del casco, parte baja que va en contacto con el agua, se genera un cambio brusco de ángulo en relación con sus laterales verticales, generando una arista entre las superficies. Esta arista influye en la estabilidad del barco y en la influencia del agua en él. Existen dos tipos de aristas, las suaves y las duras.

Las aristas suaves consisten en un redondeo de estos ángulos mencionados, esto hace que el casco se mueva más suavemente a través del agua.

En las aristas duras no se redondea el ángulo, de forma que el barco es más propenso al planeo. En este caso el agua es alejada del casco.

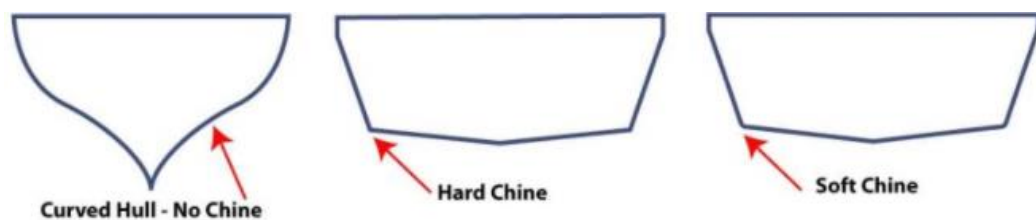


Figura 20. Casco sin aristas, casco con aristas duras, casco con aristas suaves, respectivamente (Fuente: boatsstickers.com).

Existen embarcaciones que utilizan un tipo de aristas distintas, las aristas invertidas. Estas proporcionan gran estabilidad al barco cuando el pasajero se mueve por él. Además, tienen la función de atrapar el agua bajo el casco y planear más rápido sin crear salpicaduras. [14]

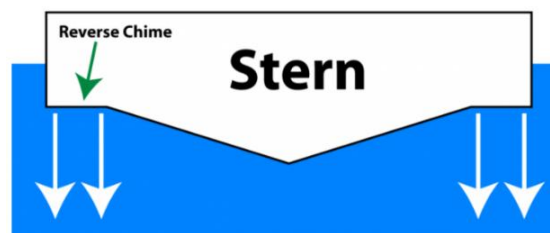


Figura 21. Sección de un casco con aristas invertidas (Fuente: boatsstickers.com).

Estos conceptos se tendrán en cuenta para aplicarlos en el momento del diseño del casco del dispositivo. Dado que el modo de navegación en el que se prevé que va a navegar es de desplazamiento con posibilidad de llegar al pre-planeo, el diseño del casco se realizará siguiendo el modelo de casco de semidesplazamiento, que es el más versátil. También se pretenden utilizar aristas suaves e incluso aristas invertidas para que el comportamiento de la moto en el agua sea lo más agradable posible para el usuario.

Tras estudiar el casco, se estudia la carrocería.

La carrocería de un vehículo es aquella parte externa que permite dar forma y utilidad a un chasis o plataforma. Es la estructura básica que permite crear el habitáculo en el que se situarán los pasajeros y la carga.

En este proyecto se considera carrocería la parte exterior de la moto situada sobre el casco. La carrocería, al sellarse sobre el casco, crea el espacio que encierra los componentes internos. Otra de sus funciones es servir como estructura sobre la que se montan otros elementos, como el asiento o la columna de dirección, que forma parte del sistema de dirección.

También tiene la finalidad de crear una estética concreta y dotar de aerodinamismo al vehículo acuático con la ayuda de, en ocasiones, cierto carenado.

En la Figura 22 se puede observar la carrocería junto los demás elementos mencionados y sus respectivas posiciones en una moto de agua.



Figura 22. Partes de una moto acuática (Fuente: yamaha.com).

En el dispositivo eléctrico, el diseño de la carrocería tendrá influencia sobre el confort de sus usuarios, por eso se diseñará enfocada en propiciar su comodidad.

Sistema de impulsión

El sistema de impulsión es el conjunto de elementos que proporciona la fuerza necesaria a la moto de agua para su avance, consta de seis elementos: la batería de arranque, el motor, el depósito de gasolina, y el subconjunto de los tres elementos principales que forman el jet drive. El jet drive está formado por: el árbol de transmisión, la turbina y la tobera direccional.

A continuación, se describen todos ellos por separado.

- Batería de arranque: Acumulador de energía cuya función principal es poner en marcha el motor de la moto de agua. Usualmente de 12V.
- Motor: Situado debajo del asiento, proporciona el par necesario al árbol de transmisión para que a su vez haga girar la turbina.

- Depósito de gasolina: Normalmente se encuentra justo debajo del manillar, como si de una moto convencional de carretera se tratara, y tiene la función de almacenar el combustible líquido (gasolina) que alimentará al motor, en las condiciones adecuadas para ello.

Conjunto Jet drive

- Árbol de transmisión: Eje conectado directamente al motor mediante un sistema de transmisión, considerado elemento del subconjunto del jet drive, se encarga de transmitir el par proporcionado por el motor a la turbina que se encuentra acoplada en su extremo.

- Turbina: Hélice que se encarga de aspirar e impulsar el agua a través de la carcasa de la bomba y dirigirla hacia la tobera para proporcionar impulso a la moto gracias al movimiento rotatorio que le transmite el árbol de transmisión.

- Tobera: Parte final del subconjunto jet drive por el que sale el chorro de agua que impulsa la turbina. Se explica más detenidamente en el subgrupo sistema de dirección. [12] [15][16]

En las siguientes figuras se observa la situación de varios de los elementos mencionados en una moto de agua.

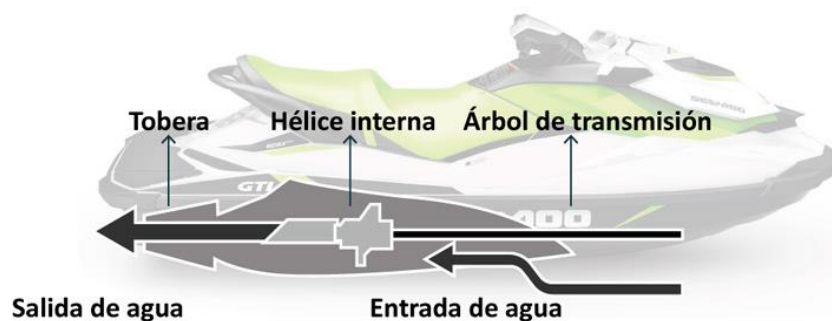


Figura 23. Elementos del jet drive en una moto acuática (Fuente: aulanautica.com).

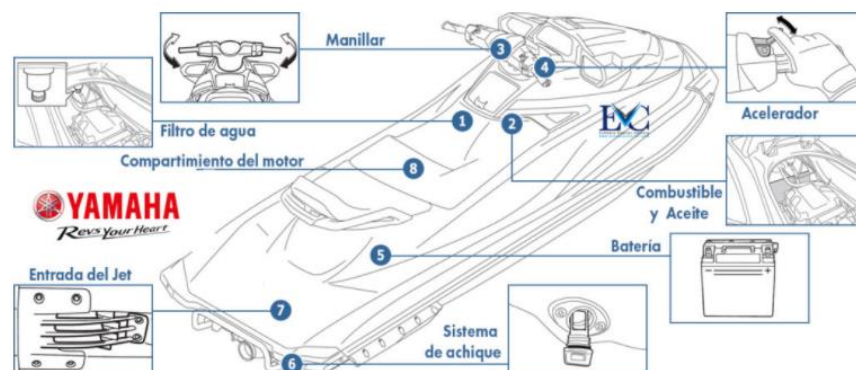


Figura 24. Disposición de elementos en una moto acuática (Fuente: Yamaha.com).

Sistema de dirección

El sistema de dirección es el que permite a la moto orientarse hacia un determinado rumbo. Como se ha mencionado anteriormente, esto se consigue orientando la tobera de la unidad jet drive en una dirección u otra.

Para este fin, el sistema de dirección cuenta con cinco elementos: el manillar, la columna de dirección, el cable de dirección, la tobera orientable y la cuchara de reverso.

A continuación, se describen los elementos del sistema de dirección con más detenimiento.

- Manillar

Consta de dos elementos principales: la barra de manillar y los controladores de impulsión.

- Barra de manillar: Es la barra acoplada a la columna de dirección que sujeta y mueve el piloto para dar las ordenes de giro necesarias a la embarcación. Dispone de empuñaduras para hacer más cómodo el pilotaje.

- Controladores de impulsión: Elementos acoplados cerca de cada empuñadura del manillar, que transmiten la orden del piloto para encender el motor, acelerar o frenar la embarcación. El controlador de la empuñadura derecha tiene la función de acelerar la moto. El controlador de la empuñadura izquierda enciende el motor y sirve de freno o marcha atrás, sirviéndose de su conexión con la cuchara de reverso, elemento que se explica más adelante.

- Columna de dirección

Es el conjunto de elementos y piezas que transmiten las ordenes de dirección dadas a través del manillar a los elementos que las hacen posibles, es decir, a la tobera direccional, mencionada en el subconjunto sistema de impulsión. Los elementos básicos de la columna de dirección son: el eje de dirección y el acoplador del cable de dirección.

- Eje de dirección: Eje rígido al que va unido el manillar que se interna en la estructura de la moto y transmite el movimiento de giro del manillar al cable de dirección a través de la pieza que acopla el cable a la columna, el acoplador del cable.

- Acoplador del cable de dirección: Pieza que une la columna de dirección con el cable de dirección.



Figura 25. Esquema de los elementos de la columna de dirección (Fuente: rivaracing.com).

- Cable de dirección

Cable unido por un extremo a la columna de dirección y por el otro a la tobera. Cuando se gira el manillar, el cable gira la tobera de forma que se alinea con el manillar, orientando de este modo la moto en la dirección deseada, siempre que esté propulsando agua.

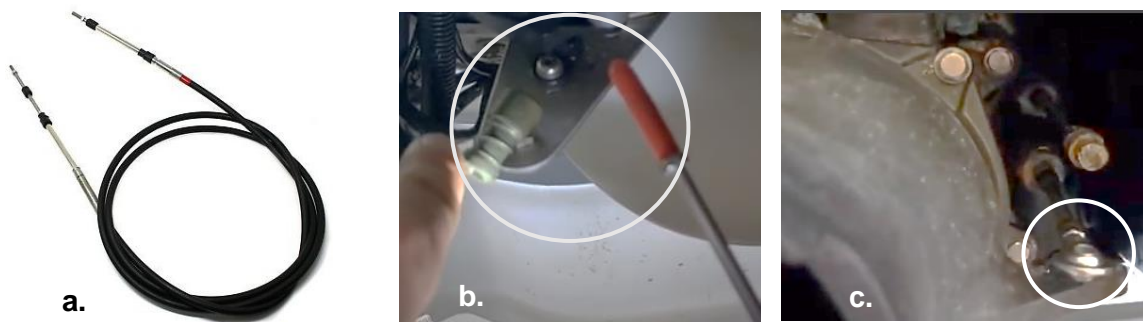


Figura 26. a) Cable de dirección, b) Unión del cable a la columna, c) Unión del cable a la tobera (Fuentes: Yamaha.com, youtube.com).

- Tobera direccional

Es la pieza final del conjunto de partes que forman el jet drive. Esta tobera es orientable y tiene la función de direccionar el chorro de agua impulsado por la turbina. De este modo la moto puede dirigirse hacia cualquier rumbo.



Figura 27. Tobera direccional (Fuente: elaboración propia).

- Cuchara de reverso

Pieza acoplada al jet drive de forma cóncava situada al final de la tobera y manejada desde el controlador izquierdo del manillar. Normalmente levantada, cuando se baja bloquea el chorro de agua de manera que este, al chocar con la cuchara de reverso se redirige hacia el fondo del agua. Esto permite, controlando cuánto se baja la cuchara y controlando la fuerza que se le da al chorro con el controlador derecho del manillar, un avance más lento de la moto hasta llegar a frenarla. Si la cuchara se baja del todo, se invierte totalmente la dirección del chorro de agua y se consigue ir marcha atrás.[12][15][16]

Esta pieza se debe a la imposibilidad de que la turbina gire en sentido contrario proyectando el agua a través de la rejilla de entrada de agua, bajo el casco, en lugar de a través de la tobera. En la Figura 28 se muestra una cuchara de reverso y sus distintas posiciones posibles.

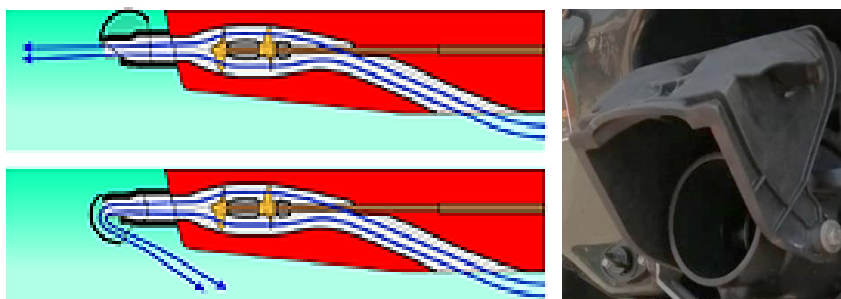


Figura 28. Posiciones de la cuchara de reverso, cuchara de reverso montada en tobera
(Fuentes: bluebird-electric.net, elaboración propia).

Una vez conocidos los elementos que forman la parte mecánica de una moto de agua se ha evaluado su posibilidad de uso en el dispositivo a diseñar.

El sistema de impulsión es el que más diferencias presentará dado que en lugar de usar un motor de combustión se utilizará uno eléctrico. Esto implica que los componentes deberán ser distintos. Además, el sistema jetdrive, diseñado para embarcaciones ágiles y veloces que utiliza la moto de gasolina, no se adecua a la experiencia de navegación que se pretende tener con nuestro dispositivo. En su lugar, se toma la decisión de impulsar el dispositivo mediante una hélice, como se impulsan habitualmente las embarcaciones a motor.

3.2.3 Compañías de suministros

Con tal de conseguir los componentes que tendrá nuestro dispositivo, se han estudiado tres empresas de motores eléctricos que pueden ofrecernos todos los elementos esenciales necesarios: Torqueedo, Bellmarine y Kräutler Elektromaschinen. Se han buscado los componentes sabiendo que las prestaciones que tendrá el dispositivo se enfocan en una navegación tranquila y que alcanzará una velocidad máxima moderada.

Pese a haber planteado la idea de usar elementos de otras casas independientes entre sí, cómo Winston battery para la batería o Kelly controllers para el controlador del motor, se ha decidido utilizar la misma casa de suministros para todos los elementos esenciales, asegurando de este modo que el diseño del dispositivo no presente problemas de compatibilidad imprevistos.

A continuación, se presentan cada una de las tres compañías y la selección de sus elementos contemplados.

Krätler Elektromaschinen



Krätler Elektromaschinen es una empresa de motores eléctricos alemana fundada en 1971.

El rango de productos que ofrece incluye: sistemas completos de impulsión y dirección eléctricas para embarcaciones a motor, sistemas auxiliares de impulsión para veleros y diseños especiales de motores de tres fases asíncronos para maquinaria industrial. [17]

Los productos de esta empresa estudiados han sido, el motor Sail Drive electric rotatable y el sistema Drive system for high Speed. Se presentan a continuación.

- Motor Sail Drive electric rotatable

Este motor de estilo POD, se elige por la potencia que puede aportar, el voltaje al que trabaja y la posibilidad de giro Azimutal.

| Type | Power consumption | Power output | Voltage | Current | Total efficiency | Weight | up to boat weight | |
|-----------------|-------------------|--------------|---------|---------|------------------|--------|-------------------|-----------|
| | | | | | | | Sailing boat | Powerboat |
| SDK-ED 2,5 AC | 3,1 kW | 2,5 kW | 24 V | 130 A | 80 % | 58 kg | 2,5 t | 1,0 t |
| SDK-ED 3,5 AC | 4,1 kW | 3,5 kW | 36 V | 114 A | 85 % | 58 kg | 4,0 t | 1,6 t |
| SDK-ED 4,3 AC | 5,0 kW | 4,3 kW | 48 V | 104 A | 85 % | 58 kg | 4,3 t | 1,7 t |
| SDK-ED 6,0 AC | 7,1 kW | 6,0 kW | 48 V | 148 A | 85 % | 58 kg | 6,0 t | 2,4 t |
| SDKH-ED 8,0 AC | 9,4 kW | 8,0 kW | 48 V | 196 A | 85 % | 87 kg | 8,0 t | 3,2 t |
| SDKH-ED 11,0 AC | 13,0 kW | 11,0 kW | 48 V | 270 A | 85 % | 98 kg | 11,0 t | 4,4 t |
| SDKH-ED 18,5AC | 21,0 kW | 18,5 kW | 96 V | 219 A | 88 % | 98 kg | 18,5 t | 7,4 t |
| water cooled | | | | | | | | |
| SDKH-ED 15,0 AC | 17,7 kW | 15,0 kW | 48 V | 370 A | 85 % | 98 kg | 15,0 t | 6,0 t |
| SDKH-ED 20,0 AC | 23,1 kW | 20,0 kW | 48 V | 480 A | 88 % | 108 kg | 20,0 t | 8,0 t |
| SDKH-ED 25,0 AC | 28,4 kW | 25,0 kW | 96 V | 296 A | 88 % | 108 kg | 25,0 t | 10,0 t |



Figura 29. Tabla de especificaciones del motor Sail Drive electric rotatable y motor (Fuente: Krätler catalog).

En este caso se escoge el modelo SDKH-ED 15,0AC.

Como se observa en la tabla de especificaciones (Figura 29), el modelo consume 17,7 kW y ofrece una potencia de propulsión de 15 kW medida en el eje de salida. Eso supone, aplicando el rendimiento de una hélice (0,8-0,95), una potencia de propulsión de alrededor de 12 kW,

suficiente para cumplir con la velocidad y tipo de navegación deseada.

El voltaje al que trabaja es de 48 V, esto propicia un menor peso y dimensión de las baterías a utilizar para su alimentación en comparación con otros modelos.

Además, el hecho de que pueda rotar lo hace una opción muy interesante para el sistema de dirección del dispositivo a diseñar.

- Drive system for high Speed

En este sistema se escoge el motor modelo WA 100/30 (Figura 30).

| Type | Motortype | Power consumption | Power output | Voltage | Current | Total efficiency | Weight |
|------------|---------------|-------------------|--------------|---------|---------|------------------|--------|
| WA 100/30 | 112M 30,0 4 W | 34,9 kW | 30 kW | 100 V | 349 A | 86 % | 76 kg |
| WA 150/40 | 132M 40,0 4 W | 45,5 kW | 40 kW | 150 V | 303 A | 88 % | 87 kg |
| WA 350/50 | IPM 6.17.12 | 53,8 kW | 50 kW | 350 V | 154 A | 93 % | 73 kg |
| WA 350/60 | IPM 6.17.18 | 64,0 kW | 60 kW | 350 V | 183 A | 93 % | 102 kg |
| WA 500/80 | IPM 6.17.25 | 85,5 kW | 80 kW | 500 V | 171 A | 93 % | 102 kg |
| WA 500/100 | IPM 6.17.25 | 107,5 kW | 100 kW | 500 V | 215 A | 93 % | 124 kg |



Figura 30. Especificaciones del Drive system for high-speed y Drive system for high speed (Fuente: Krätler catalog).

La potencia de propulsión que aporta este modelo es de 30 kW y consume 34,9 kW. Esta potencia propulsora sería suficiente para cumplir con la velocidad moderada. En este caso el voltaje al que trabaja es de 100 V.

Torqueedo



Torqueedo es una empresa alemana, pionera en el ámbito de la movilidad eléctrica en el agua.

Ofrece entre sus productos motores fueraborda e intraborda, así como sistemas de propulsión eléctricos e híbridos completos desde 0,5 a 100 kW. También consta con una amplia gama de accesorios como baterías de litio o dispositivos de carga solar. [18]

Los productos estudiados de esta empresa han sido: el motor Cruise 10 FP Sail Drive, el motor Deep Blue i25, la batería Power 48-5000 y la batería de alto voltaje BMW i3. Se describen a continuación.

- Motor Cruise 10.0 FP Sail Drive

Este es un motor tipo POD, sin giro azimutal, diseñado para fijarse al casco de la embarcación.

| Modelo | Cruise 10.0 FP Saildrive Mount |
|--|--------------------------------|
| Potencia de entrada máxima | 12 kW |
| Potencia de entrada continua | 10 kW |
| Tensión nominal | 48 V |
| Potencia de propulsión continua | Máx. 5,6 kW |
| Peso de torpedo y placa de fijación | 32 kg |
| Peso de cuadro electrónico | 7 kg |
| Peso de juego de cables | 9 kg |
| Revoluciones de eje de hélice máx. | 1.400 rpm |
| Mando | Acelerador remoto |
| Avance/retroceso regulable sin escalas | Sí |



Figura 31. Tabla de especificaciones del motor Cruise 10.0 FP Sail Drive y motor (Fuente: Catálogo Torqueedo).

Como vemos en su tabla de especificaciones, mostrada en la Figura 31, el motor ofrece una potencia de propulsión continua máxima de 5,6 kW consumiendo 10 kW. El voltaje al que trabaja es de 48 V.

Según sus fabricantes, este motor es capaz de alcanzar los 30 km/h suministrándole la potencia de entrada necesaria. La Figura 32 muestra la velocidad de la versión fueraborda de este mismo motor, con las mismas especificaciones.

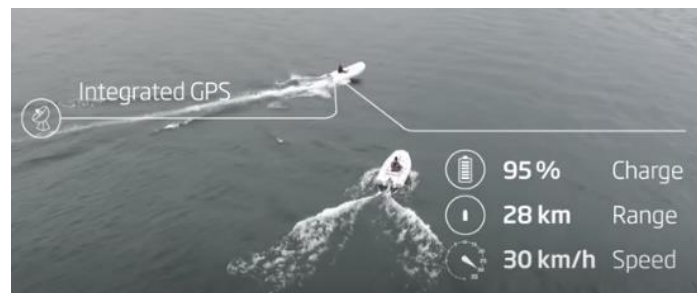


Figura 32. Rango y velocidad conseguidos con motor Torqueedo de mismas especificaciones (Fuente: youtube.com).

- Motor Deep Blue i25

El motor Deep Blue i25 es un motor compatible con el Sistema Deep Blue de Torqueedo, que ofrece una solución completa de impulsión eléctrica.

| Model | DEEP BLUE 80 - 1400/1800 | DEEP BLUE 40 - 1400/1800 |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| Maximum shaft power | 62.8 kW/57.8 kW | 25 kW |
| Continuous shaft power | 50 kW | 25 kW |
| Propulsive power | > 32.4 kW | > 16.2 kW |
| Equivalent motor power* | 80 HP | 40 HP |
| Weight of motor, including power electronics (excluding batteries) | 88 kg | 88 kg |



Figura 33. Tabla de especificaciones del motor Deep Blue i25 y motor (Fuente: Catálogo Torqueedo).

El sistema Deep Blue es un sistema de alto rendimiento, totalmente integrado en la embarcación, que aúna gestión de energía y de propulsión garantizando la seguridad para sus usuarios. En la Figura 34 se muestra un ejemplo de su esquema con los componentes que lo forman.

Para este proyecto se escoge el modelo Deep Blue 40-1400/1800 Que proporciona una potencia de propulsión de 16,2 kW, suficientes para cumplir con las pretensiones de velocidad.



Figura 34. Esquema del sistema Deep Blue de Torqueedo (Fuente: Catálogo Torqueedo).

- Batería Power 48-5000

Torqueedo ofrece la batería Power 48-5000 que proporciona 5 kWh, para alimentar sus motores.

| Característica | Valor |
|--------------------------------------|--|
| Tensión nominal | 44,4 V |
| Tensión final de carga | 50 V |
| Tensión final de descarga | 36 V |
| Tensión máxima en los polos | 50 V |
| Intensidad máxima de descarga | 200 A |
| Temperatura ambiente, almacenamiento | -25 °C hasta +60 °C |
| Temperatura ambiente, carga | 0 °C hasta +45 °C |
| Temperatura ambiente, descarga | -10 °C hasta +50 °C |
| Energía nominal | 5275 Wh |
| Energía útil | 5000 Wh |
| Conexión en serie | no permitida |
| Conexión en paralelo | máximo 2 P con red TQ-CAN y el kit de gateway de Torqueedo |
| Clase de protección IP | IP 67 |



Figura 35. Tabla de especificaciones de la 48-5000 de Torqueedo y batería (Fuente: Catálogo Torqueedo).

Su tensión nominal es de 44,4 V, eso supone que para conseguir la máxima potencia del motor Cruise 10.0 FP es necesaria la conexión de dos baterías en paralelo.

- Batería BMW i3

Esta batería de alto voltaje proporciona 30,5 kWh.

| Specification | Value/unit |
|---------------------------------|------------------------------|
| Rated voltage | 345 V |
| Maximum voltage | 396 V |
| Maximum continuous output power | 55 kW |
| Nominal capacity | 94 Ah |
| Dimensions with cooling | 1958 mm x 1038 mm x 183.5 mm |
| Multiple batteries per motor | Yes |
| Usable energy | 30.5 kWh |
| Temperature range for storage | -40 °C to +40 °C |
| Charge state during storage | Between 30 % and 80 % |



Figura 36. Tabla de especificaciones de la batería BMWi3 de Torqueedo y batería (Fuente: Catálogo Torqueedo).

Está diseñada para dar soporte al sistema Deep Blue de Torqueedo, y ha sido adaptada del mundo de la automoción, utilizada en ese campo por los coches BMW i3, para poder usarse también en navegación.

Bellmarine



Bellmarine es una empresa holandesa de propulsión marítima, entre otros servicios, con más de 4000 sistemas instalados en distintas áreas de aplicación. Transfluid S.A, es una compañía italiana fabricante de productos de transmisión de potencia desde hace más de 60 años.

En el año 2018 estas dos compañías se asociaron para crear Transfluid North Europe B.V. con la que ofrecen soluciones eléctricas e híbridas para cualquier tipo de embarcación. [19]

Los productos estudiados, ofrecidos por Bellmarine en colaboración con Transfluid, han sido el motor Sail Master y el motor Drive Master junto con el conjunto de baterías ofertadas. A continuación, se presentan los dos motores. [20]

- Motor Sail Master

El motor Sail Master es un motor tipo POD, con giro azimutal.

| DESCRIPTION | MOTOR SIZE | NOMINAL kW | INTERMITTENT kW | BATTERY Vdc | MOTOR rpm |
|----------------|------------|---------------|--------------------|----------------|--------------|
| SailMaster 3W | 180-4 | 2.5 | 3 | 48 | 1500 |
| SailMaster 7W | 180-8 | 5 | 7 | 48 | 1500 |
| SailMaster 10W | 180-12 | 8 | 10 | 48 | 1500 |
| SailMaster 15W | 220-20 | 10 | 15 | 48 | 1500 |
| SailMaster 18W | 180-12 | 12 | 18 | 96 | 3000 |
| SailMaster 25W | 220-20 | 20 | 25 | 96 | 3000 |



Figura 37. Tabla de especificaciones del motor Sail Master y motor (Fuente: Bellmarine Brochure).

El modelo que se contempla es el SailMaster 18W, que proporciona una potencia de 12 kW en el eje de la hélice que se traduce en una potencia de propulsión total aplicando el rendimiento de la hélice de alrededor de 9,5 kW, suficiente para alcanzar la velocidad de avance deseada, como se observa en la tabla de especificaciones. Trabaja a una tensión de 96 V. Se escoge el modelo 18W sobre el 25W porque el 18W es algo menor en sus dimensiones.

- Motor Drive Master

En este caso se selecciona el modelo Drive Master 20W, que proporciona una potencia nominal de 15 kW en el eje de salida del motor.

| DESCRIPTION | MOTOR SIZE | NOMINAL kW | INTERMITTENT kW | BATTERY Vdc | MOTOR rpm |
|---------------------|------------|---------------|--------------------|----------------|--------------|
| DriveMaster 3W | 180-4 | 2.5 | 3 | 48 | 1500 |
| DriveMaster 7W | 180-8 | 5 | 7 | 48 | 1500 |
| DriveMaster 10W | 180-12 | 8 | 10 | 48 | 1500 |
| DriveMaster 15W | 220-20 | 10 | 15 | 48 | 1500 |
| DriveMaster 20W EVO | 220-20 (*) | 15 | 20 | 48 | 1500 |
| DriveMaster 20W | 220-20 | 15 | 20 | 96 | 1500 |
| DriveMaster 30W | 220-35 | 25 | 30 | 144 | 1500 |
| DriveMaster 45W | 300-50 | 35 | 45 | 144 | 1500 |
| DriveMaster 55W | 300-75 | 45 | 55 | 144 | 1500 |



Figura 38. Tabla de especificaciones del motor Drive Master y motor (Fuente: Bellmarine Brochure).

Aplicando el rendimiento que suele tener una hélice, este valor queda cercano a los 12 kW. Potencia suficiente para alcanzar la velocidad deseada. La tensión necesaria proporcionada por las baterías que alimenten a este motor se encuentra en 96 V.

4 Especificaciones

Una vez conocida la arquitectura de una moto de agua y haber realizado un estudio de los elementos comerciales, adecuados a la experiencia de navegación deseada, que ofrece el mercado, en el siguiente apartado se exponen las especificaciones para el dispositivo acuático a diseñar.

Función principal: Desplazamiento a través de aguas tranquilas. Pensada para trayectos cortos, salidas con fines ociosos y de entretenimiento.

Funciones secundarias: Permitir el disfrute más allá del relacionado con su conducción, como tener espacio suficiente para actividades como la pesca o el simple relax.

Usuario: Producto dirigido tanto a jóvenes como a adultos, a partir de los 16 años con autorización. Enfocado a personas activas con ganas de entretenimiento.

Entorno: Zonas de playa o de aguas dulces navegables, como pantanos o embalses.

Requisitos relacionados con la facilidad de uso: Se busca una conducción intuitiva, que a simple vista se identifiquen las funciones de los mandos de control y no requiera por parte del usuario experiencia previa en la conducción de otros dispositivos similares para su disfrute.

Requisitos estáticos: Estabilidad en el agua sin riesgo de vuelco por imprudencia.

Requisitos dinámicos: Buena manejabilidad y estabilidad durante su uso.

Condiciones medioambientales de uso: Pensado para utilizarse en exteriores y en condiciones meteorológicas propicias, estas son las que propicien aguas tranquilas y calmadas en las que no haya agentes medioambientales externos que dificulten su utilización, como lluvia o fuertes vientos.

Interacción con el entorno: El producto va a estar durante todo el tiempo de uso en contacto con su entorno. Debe interactuar con agua salada y agua dulce y en ocasiones con zonas arenosas. No es un problema para las formas de vida acuáticas.

Medioambiente y ecología: Al impulsarse 100% mediante energía eléctrica no produce emisiones perjudiciales para el medioambiente en los puntos por donde discurre. Tampoco genera contaminación acústica.

Seguridad: Enfocada en su usuario, al utilizar elementos eléctricos se buscará el grado de protección adecuado para garantizar la seguridad frente a accidentes relacionados con posibles descargas.

Calidad: Se buscará la mayor calidad posible en el desarrollo del diseño. Enfocado en llegar a realizar en algún momento un prototipo, de momento no se plantearán cuestiones de calidad-precio.

Vida media: Como el dispositivo es 100% eléctrico, alimentado por baterías, su tiempo de vida media irá en relación con el tiempo de vida media de la batería.

Requisitos de mantenimiento: Revisar y efectuar los trabajos de mantenimiento de los componentes con la frecuencia que el fabricante de cada uno de ellos recomiende y de la manera que se indique. Encargar los trabajos de mantenimiento que requieran de un especialista a un profesional especializado.

Propiedades específicas del producto

Tamaño: Aproximado; Eslora = 3,50 m, Manga = 1,20 m, Altura = 1,0 m.

Pasajeros: 2

Masa: Estimada; 450 kg.

Autonomía en tiempo: 2 horas.

Velocidad máxima: 16 nudos, equivalente a 30 km/h.

Propulsión: Eléctrica, mediante hélice.

Estética: Llamativa, con colores vivos para su fácil reconocimiento en aguas abiertas.

Materiales: Acero inoxidable, fibra de carbono, aluminio, ABS, bronce.

Ergonomía: Lo más cómoda posible para que el usuario no realice posturas forzadas. Pero no es una característica principal en la que se enfocará este producto.

Procesos de fabricación: Moldeo por contacto a mano, mecanizado.

5 Diseño conceptual

A continuación, se presentan los pasos seguidos para desarrollar el diseño conceptual del dispositivo. Para ello, primero se han decidido las dimensiones que tendrá el dispositivo y estimado su flotabilidad, después se ha realizado una predicción de la potencia necesaria para cumplir con las especificaciones previstas de navegación y velocidad y finalmente se ha procedido a realizar el diseño conceptual con los elementos adecuados.

5.1 Dimensiones principales

Las dimensiones del dispositivo se han decidido tras realizar un estudio de las dimensiones de diferentes modelos de motos acuáticas existentes en el mercado.

Para ello, se ha creado una base de datos de las dimensiones de otras motos de agua en una hoja de cálculo y se han realizado gráficos relacionando la eslora con las demás dimensiones. A partir de estos gráficos se han hecho regresiones lineales para extraer las ecuaciones que relacionasen la eslora con la manga, la eslora con el desplazamiento (masa del dispositivo) y la eslora con la altura. De este modo tan solo se debía decidir la eslora para conocer las demás medidas del dispositivo.

La eslora para el cálculo se ha aproximado a 3,50 metros, como se muestra en las propiedades específicas del producto del apartado especificaciones (apartado 4), tras realizar la media de las esloras de las motos de agua estudiadas. El resultado se muestra en el extracto de la hoja de cálculo utilizada que muestra la Figura 39.

| Dimensiones según regresiones | |
|-------------------------------|--------|
| Eslora (m) | 3,50 |
| Manga (m) | 1,25 |
| Altura (m) | 1,17 |
| Desplazamiento (kg) | 412,65 |

Figura 39. Resultado de las regresiones para el cálculo de las Dimensiones del dispositivo
(Fuente: elaboración propia).

Se tiene presente que, al tratarse de un vehículo eléctrico, sus componentes pueden ser más voluminosos y pesados que en el caso de una embarcación a motor de combustión, por lo que a pesar de diseñar el dispositivo siguiendo las medidas obtenidas, se tendrá cierta flexibilidad en cuanto a su aumento. Se prevé que la eslora pueda resultar mayor, puesto que se evitará concentrar peso en la proa, dejándola libre de elementos. El desplazamiento también se espera superior a causa de la masa de las baterías. Las demás dimensiones se mantendrán lo más aproximadas posibles a los cálculos realizados.

Con estas dimensiones, aproximando la altura del casco a un tercio de la total, y conociendo

su desplazamiento, se ha podido estimar la flotabilidad del dispositivo. El valor del desplazamiento calculado es igual al peso de agua desalojada, con esto se puede saber el volumen de agua desalojada y por tanto el volumen del casco sumergido. Una masa de agua desplazada igual a 412,65 kg, es equivalente a un volumen de agua de 0,41 m³. El volumen total del casco se estima con un prisma rectangular sobre un prisma triangular como muestra la Figura 40.

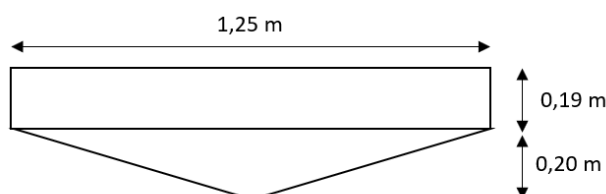


Figura 40. Sección de la geometría para la estimación del volumen del casco (Fuente: elaboración propia).

La eslora se acorta a 3 metros pensando en que la proa tendrá menos volumen al estrecharse y se obtiene un volumen de casco de 1,06 m³, como se muestra en el siguiente cálculo.

$$\text{Volumen prisma triangular} = \frac{0,2 * 1,25}{2} * 3 = 0,37 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen prisma rectangular} = 0,19 * 1,25 * 3 = 0,71 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen estimado del casco} = 0,37 + 0,71 = 1,06 \text{ m}^3$$

Como el volumen desplazado es de 0,4 m³, el casco sobresaldría del agua aproximadamente los 19 cm del prisma rectangular.

5.2 Predicción de la potencia propulsiva

Con el fin de calcular la potencia de propulsión necesaria para cumplir con las especificaciones previstas, se han contemplado tres métodos: una aproximación comparativa utilizando la relación cúbica existente entre la potencia necesaria y la velocidad conseguida, el método de Savitsky y una simulación por software informático utilizando el simulador Fluent de ANSYS. A continuación, se expone cada método y sus resultados.

- Relación de potencias y velocidades

En régimen de desplazamiento, la potencia necesaria para que una embarcación vaya a cierta velocidad, incrementa cúbicamente respecto a esta. Es decir, si se duplica la velocidad de navegación, la potencia de motor necesaria se debe multiplicar por ocho respecto a la anterior.

En este método, se ha realizado el cálculo de la potencia necesaria para nuestro dispositivo utilizando este factor cúbico entre potencias, partiendo de motos de agua y embarcaciones existentes de características similares, presentados en el estudio de mercado de las embarcaciones eléctricas (apartado 3.1.2): la Narke GT95 y el Gliss Speed.

La potencia que se ha predicho con este método para que nuestro dispositivo alcance la velocidad de 30 km/h ha sido de 6,75 kW. Para ello se han calculado las potencias que requeriría la Narke y el Gliss Speed para navegar a la velocidad deseada y se ha hecho la media de estos resultados. A continuación, se explica el proceso.

En primer lugar, se realiza el cálculo de la potencia que requiere la Narke para ir a la velocidad máxima decidida para nuestro dispositivo en las especificaciones, que son 30 km/h.

Se hace cogiendo como referencia tanto la velocidad máxima que alcanza la moto en su máxima potencia, respectivamente 75 km/h y 71 kW (Tabla 1), como su velocidad crucero de 55,5 km/h, que alcanza con una potencia de 45 kW. [9]

Tomando como referencia su velocidad y potencia máximas se obtiene que para ir a 30 km/h la Narke requiere de 4,5 kW.

Tomando como referencia la velocidad y potencia crucero se obtiene que para ir a 30 km/h la Narke requiere de 7,1 kW.

| Datos técnicos | | Narke GT95 |
|--|----------|------------|
| Eslora | m | 4.02 |
| Manga | m | 1.2 |
| Altura | m | 1.1 |
| Masa en vacío | kg | 420 |
| Carga máxima | kg | 225 |
| Motor eléctrico asíncrono trifásico | | |
| Potencia máxima | kW | 71 |
| Momento máximo | Nm | 65.5 |
| Velocidad máxima | km/h | 75 |
| Autonomía | h | 2 |
| Tiempo de recarga | h | 1.5 |
| Batería | kWh | Li-Ion/24 |
| Capacidad | Personas | 3 |

Tabla 1. Datos técnicos de la Narke GT95 (Fuente: Narke Brochure).

Se muestran los cálculos a continuación. Primero, con los valores máximos y después, con los valores en su navegación crucero.

- Cálculo con la velocidad y la potencia máxima:

$$\text{Velocidad máxima Narke} = 40,5 \text{ kn} = 75 \text{ km/h}$$

$$\text{Potencia máxima Narke} = 71 \text{ kW}$$

Se calcula la relación existente entre la velocidad máxima de la Narke y la velocidad de 30km/h.

$$\text{Relación entre las velocidades} = \left(\frac{v_{\text{máx. Narke}}}{v_{\text{deseada}}} \right) = \frac{75}{30} = 2,5$$

Como se ha mencionado, la relación entre potencias es el cubo de la relación entre velocidades, por lo tanto, la potencia necesaria para ir a 30 km/h tomando como referencia la potencia máxima será de:

$$(\text{relación entre potencias}) = (\text{relación entre velocidades})^3 = 2,5^3$$

$$\left(\frac{\text{Potencia de propulsión máxima Narke}}{\text{Potencia propulsión a 30 km/h}} \right) = 2,5^3$$

$$(\text{Potencia propulsión a 30 km/h}) = \frac{71 \text{ kW}}{2,5^3} = 4,5 \text{ kW}$$

- Cálculo con la velocidad y la potencia crucero:

$$\text{Velocidad crucero Narke} = 30 \text{ kn} = 55,5 \text{ km/h}$$

$$\text{Potencia continua Narke} = 45 \text{ kW}$$

Siguiendo el mismo proceso, se calcula la potencia necesaria para ir a 30 km/h.

$$\text{Relación entre velocidades} = \left(\frac{v_{\text{crucero Narke}}}{v_{\text{deseada}}} \right) = \frac{55,5}{30} = 1,85$$

$$\left(\frac{\text{Potencia de propulsión máxima Narke}}{\text{Potencia propulsión a 30 km/h}} \right) = 1,85^3$$

$$(\text{Potencia propulsión a 30 km/h}) = \frac{45 \text{ kW}}{1,85^3} = 7,1 \text{ kW}$$

En segundo lugar, se realiza el cálculo de la potencia que requeriría el Gliss Speed para ir a 30km/h.

Como se puede observar en su ficha técnica (Tabla 2), este kart acuático alcanza los diez nudos, equivalentes a 18,5 km/h durante 2 horas, utilizando una potencia continua de motor de 1,5 kW.

| Datos técnicos | | Gliss Speed |
|---|-------------------------------|-------------|
| Eslora | m | 2.49 |
| Manga | m | 1.25 |
| Altura | m | 0.51 |
| Masa en vacío | kg | 65 |
| Masa máxima del piloto | kg | 110 |
| Motor eléctrico corriente continua | | |
| Potencia continua | kW | 1.5 |
| Empuje | N | 150 |
| Alimentación | V | 48 |
| Velocidad máxima | kn (km/h) | 14 (26) |
| Autonomía a 10 nudos (18.5 km/h) | h | 2 |
| Tiempo de recarga | h, min | 1h 45min |
| Capacidad | Personas | 1 |
| Batería | Li-Ion fosfato | |
| Modo de propulsión | Hélice de plástico monobloque | |

Tabla 2. Datos técnicos del Gliss Speed (Fuente: gliss-speed.com).

Si aplicamos las relaciones del mismo modo que antes, tomando en este caso como referencia la potencia continua de 1,5 kW y su velocidad crucero de 18,5 km/h, se calcula que para ir a una velocidad de 30 km/h se requerirían 6,4 kW.

Se muestra el cálculo a continuación.

$$Velocidad\ crucero = 18,5\ km/h$$

$$Potencia\ continua = 1,5\ kW$$

$$Relación\ entre\ velocidades = \left(\frac{v_{crucero\ Gliss\ Speed}}{v_{deseada}} \right) = \frac{18,5}{30} = 0,617$$

Dado que la relación entre potencias es el cubo de la relación entre velocidades, la potencia necesaria para ir a 30 km/h tomando como referencia la potencia continúa será de 6,4 kW.

$$(\text{relación entre potencias}) = (\text{relación entre velocidades})^3 = 0,617^3$$

$$\left(\frac{\text{Potencia de propulsión continua Gliss Speed}}{\text{Potencia propulsión a 30 km/h}} \right) = 0,617^3$$

$$(\text{Potencia propulsión a 30 km/h}) = \frac{1,5kW}{0,617^3} = 6,4 kW$$

Haciendo la media con las potencias calculadas para alcanzar los 30 km/h, a partir de los valores de la velocidad y de la potencia crucero, tomando como referencia la Narke y el Gliss Speed, se deduce que la potencia necesaria de impulsión estará en torno a los 6,75 kW.

$$\text{Potencia media resultante} = \frac{7,1 + 6,4}{2} = 6,75 kW$$

- Método de Savitsky

El Dr. Daniel Savitsky (1921-2020), fue un reconocido ingeniero que realizó notables aportes profesionales a los campos de la arquitectura naval y a la ingeniería marina. Uno de estos aportes fue dedicarse a la investigación en barcos marinos de alta velocidad, de donde resultó un modelo matemático, que acabó convirtiéndose en el Método de Savitsky, utilizado en todo el mundo. [22]

Este método permite hacer una predicción de la resistencia que afronta un barco de alta velocidad en régimen de semi planeo y de planeo. Mediante una serie de variables y ecuaciones relacionadas obtenidas empíricamente a través de experimentos realizados con diferentes modelos de barcos, se puede obtener el valor de la resistencia al avance que soportará un casco de planeo, y con este valor obtener el valor de la potencia que será necesaria para ir a una determinada velocidad. [23]

Tras investigar este método, se ha preparado una hoja de cálculo con el método de Savitsky. Se han realizado los cálculos tomando los datos de las dimensiones previstas en el apartado 5.1.

Aplicando el método considerando una velocidad de avance igual a 30 km/h, el resultado de la fuerza de resistencia que afronta el casco es de 295,64 N. Multiplicando este valor por la velocidad de avance en metros por segundo, se puede obtener la potencia mínima necesaria para que el dispositivo alcance los 30km/h. La potencia mínima necesaria son 2,45 kW. Estos resultados se muestran en el extracto de la hoja de cálculo del método Savitsky de la Figura 41.

| Resistencia al agua | |
|---------------------------|----------|
| To | 3,38 ° |
| Rfo | 57,82 N |
| Resistencia casco desnudo | 295,64 N |
| Potencia | 2,45 kW |

Figura 41. Resultado método Savitsky (Fuente: elaboración propia).

- Simulador Fluent de ANSYS

A través del software de simulación de dinámica de fluidos ANSYS Fluent, se calcula la resistencia al avance del casco del diseño que se presenta en este proyecto.

Para utilizar este método se ha tenido que diseñar antes el casco del dispositivo. En el apartado 5.3 se describirá el proceso seguido hasta llegar al modelo del casco final con el que se ha realizado la simulación. El resultado de la potencia calculada con ANSYS Fluent ha sido de 22,75 kW para una velocidad de avance de 30 km/h y de 13,52 kW para una velocidad de 25 km/h.

A continuación, se muestra el proceso seguido con el Simulador ANSYS Fluent.

- Preparación del modelo:

Para crear la geometría se ha modelado, por un lado, un sólido de volumen igual al sumergido y por otro un sólido para representar la masa de agua.

Con estos dos sólidos se ha creado un booleano (Figura 43), cuerpo con el que se realiza la simulación.

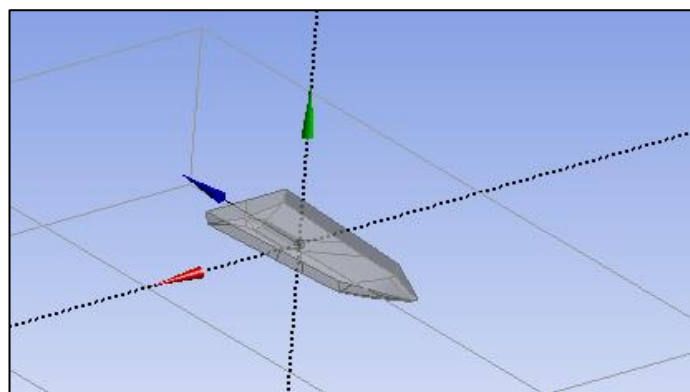


Figura 42. Sólido del volumen del casco sumergido (Fuente: elaboración propia).

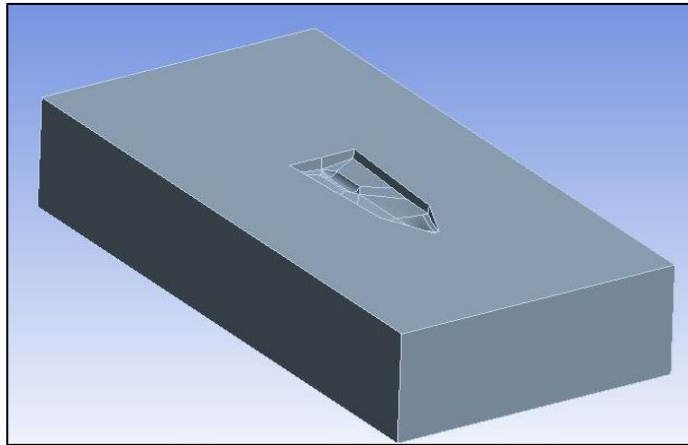


Figura 43. Boleano creado (Fuente: elaboración propia).

El mallado de la geometría se ha realizado primero con el mallado automático que realiza el software, enfocándolo para un análisis CFD, y posteriormente se le ha aplicado un refinado en las áreas en las que presentaba peor calidad en sus elementos.

El resultado final del mallado se muestra en la Figura 44, en la que también se muestra el parámetro de la calidad de malla Element quality.

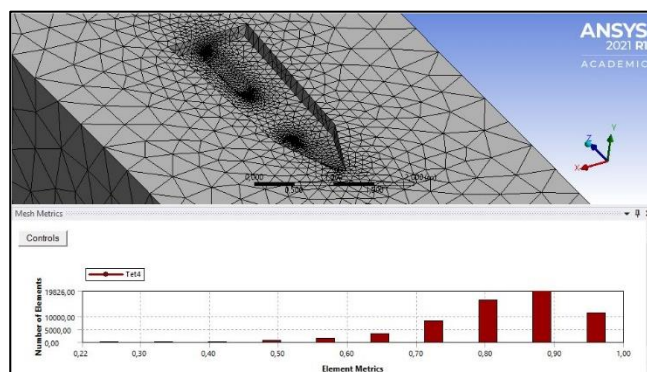


Figura 44. Mallado de la geometría (Fuente: elaboración propia).

- Preparación de la simulación con Fluent

A continuación, se ha procedido a definir los parámetros para realizar la simulación.

Se han definido las caras de la geometría para diferenciar las zonas del contorno por el que fluirá el líquido. Creando la entrada (inlet) por proa, la salida (outlet) por popa, la pared (wall) que representa la parte exterior del casco sumergido, y el resto de contorno simétrico, llamado sym, de manera que el comportamiento del fluido no varíe en contacto con esa parte de la geometría. El resultado se muestra en la Figura 45.

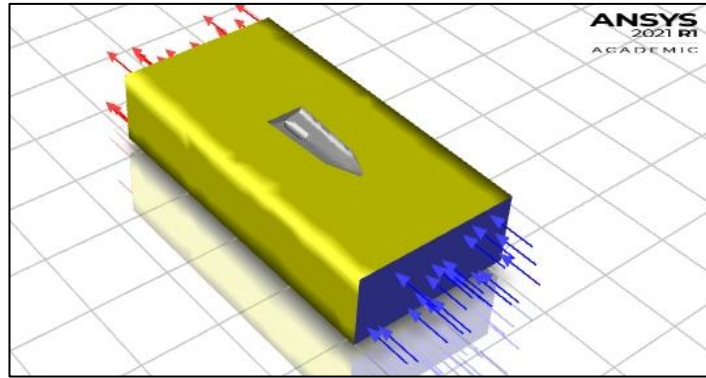


Figura 45. Zonas de la simulación: Inlet (azul), Outlet (rojo), Sym (amarillo) y Wall (blanco)
(Fuente: elaboración propia).

Una vez definidas las caras se han definido sus características.

Se ha establecido el fluido como agua salada, copiando de la base de datos del mismo programa el elemento agua, y variándole la densidad para establecerla en un valor de 1027 kg/m³. Se ha añadido la fuerza de la gravedad al modelo y se han establecido dos velocidades de entrada del fluido, 8,33m/s (30km/h) y 7m/s (25 km/h) para simular las fuerzas que soportará la moto.

Las condiciones del fluido se han considerado turbulentas, dado que el número de Reynolds, para ambas velocidades es superior a 4000.

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Ecuación 2. Número de Reynolds.

Dónde V es la velocidad del fluido en m/s, L la eslora del casco en metros y ν la viscosidad cinemática del fluido en m²/s.

$$Re(8,33 \text{ m/s}) = 27,48 \times 10^6$$

$$Re(7 \text{ m/s}) = 23,1 \times 10^6$$

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones según la velocidad de avance.

- Simulación a 30km/h (8,33m/s):

Los resultados de esta simulación han mostrado los puntos donde se alcanzan las presiones más elevadas en el casco, situadas en la zona de la proa y en el inicio del rebaje para el motor. Se pueden apreciar estas dos zonas en la Figura 46, que muestra la presión estática recibida.

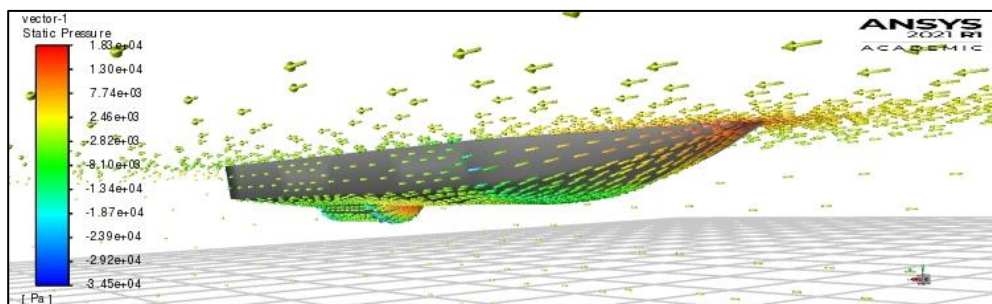


Figura 46. Presión estática a 30 km/h (Fuente: elaboración propia).

La fuerza total resultante en el eje Z es de 2746.02 N (Figura 47). Multiplicando esta fuerza por la velocidad de avance, 8,33m/s, se obtiene la potencia necesaria de impulsión que resulta de 22,75 kW, como se muestra a continuación.

$$Potencia\ de\ impulsión\ necesaria = 2731,79 * 8,33 = 22755,81\ W = 22,75kW$$

| Forces - Direction Vector (0 0 1) | | | | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|-----------|--------------|------------|-------------|
| Zone | Forces [N] | | | Coefficients | | |
| | Pressure | Viscous | Total | Pressure | Viscous | Total |
| wall | 2551.2864 | 180.50337 | 2731.7897 | 0.089590458 | 0.00633852 | 0.095928978 |
| Net | 2551.2864 | 180.50337 | 2731.7897 | 0.089590458 | 0.00633852 | 0.095928978 |

Figura 47. Resultado de las fuerzas que soporta el casco en el eje Z a 8,33m/s (Fuente: elaboración propia).

- Simulación a 25km/h (7m/s)

Los resultados tras realizar esta simulación han mostrado que, del mismo modo que en la simulación a 30km/h, los puntos de máxima presión se encuentran en proa y al inicio del rebaje para el motor.

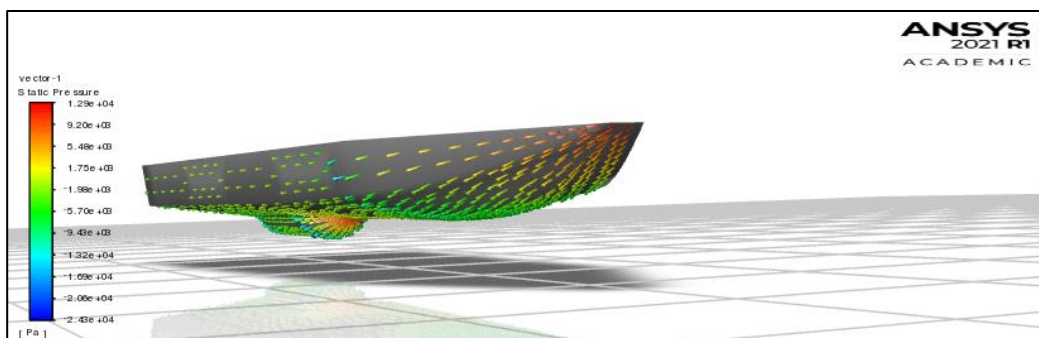


Figura 48. Presión estática en el casco a 25 km/h (Fuente: elaboración propia).

En este caso la fuerza resultante en el eje Z es de 1941,84 N (Figura 49). Multiplicando esta fuerza por la velocidad de avance, 7m/s, se obtiene la potencia necesaria de impulsión, que

resulta de 13,52 kW, como se muestra a continuación.

$$\text{Potencia de impulsión necesaria} = 1931,6498 * 7 = 13521,55 \text{ W} = 13,52 \text{ kW}$$

| Forces - Direction Vector (0 0 1) | | | | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|-----------|--------------|--------------|-------------|
| Zone | Forces [N] | | | Coefficients | | |
| | Pressure | Viscous | Total | Pressure | Viscous | Total |
| wall | 1799.646 | 132.00385 | 1931.6498 | 0.08949181 | 0.0065642149 | 0.096056025 |
| Net | 1799.646 | 132.00385 | 1931.6498 | 0.08949181 | 0.0065642149 | 0.096056025 |

Figura 49. Fuerzas en el eje Z sobre el casco a 25 km/h (Fuente: elaboración propia).

5.2.1 Conclusiones de la predicción de potencias

Tras analizar los resultados obtenidos a partir de los tres métodos empleados para la predicción de la potencia necesaria en el dispositivo, se ha tomado la decisión de utilizar como referencia la potencia calculada mediante el método de la relación de potencias y velocidades, en la que se ha obtenido una potencia media de 6,75 kW. Según esta potencia, todos los motores estudiados en la búsqueda de componentes comerciales podrían suplir la demanda de potencia requerida.

La potencia calculada con el método Savitsky no se ha tomado como referencia porque este método está diseñado para predecir la potencia necesaria de los cascos de planeo en un régimen de navegación también de planeo. El dispositivo que se diseña en este proyecto no se prevé que llegue a planear y su régimen de navegación habitual será el de desplazamiento.

La potencia calculada mediante el simulador de fluidos ANSYS Fluent es el resultado de una predicción específica para el casco desarrollado en el diseño final, por lo que no se toma como referencia para los otros diseños realizados. Se avanza que la elección del motor para el diseño final suple con la potencia requerida según los cálculos de esta simulación.

También se concluye que una prueba con un primer prototipo representativo del dispositivo final permitiría conocer la verdadera potencia necesaria.

5.3 Diseño conceptual

En el siguiente apartado se procede a presentar los diseños elaborados.

En total se presentan tres diseños, dos de ellos con elementos de la compañía Torqueedo y uno con elementos de la compañía Bellmarine.

Se ha decido no diseñar utilizando a la compañía Kräutler Electromaschinen por los motivos que se exponen a continuación:

- Descarte de Kräutler Electromaschinen

Las razones de no plantear un diseño utilizando la casa de suministros Kräutler Electromaschinen fueron la dificultad de encontrar información y el factor de forma y tamaño que presentaban los motores que se pretendían utilizar.

Tras ponernos en contacto con la compañía, y conseguir el plano de las dimensiones del motor sail drive, se vio que el motor tenía unas dimensiones difíciles de adaptar al diseño.

El conjunto del motor tiene una altura muy similar a la altura total de la moto. Eso representaba dotar a la moto de una geometría concreta debido al motor, sin libertad de decisión. La potencia que ofrece tampoco era un justificante suficiente para seguir trabajando con este motor.

La opción de utilizar el sistema Drive system se descartó también al ser similar a la opción ofrecida por Bellmarine, con su motor Drive Master.

5.3.1 Diseños con componentes de la compañía Torqueedo

A continuación, se presentan las dos opciones planteadas utilizando los elementos de la marca Torqueedo, vistos anteriormente en el subapartado 3.2.3.

- Diseño con motor Deep Blue i25 de Torqueedo

En este diseño se pretende utilizar un motor Deep blue i25 de la marca Torqueedo junto con la batería Torqueedo BMWi3.

Esta opción fue desestimada enseguida al comprobar que las dimensiones de los componentes hubieran convertido el diseño en un dispositivo que no encajaba con las especificaciones de tamaño que se pretendían.

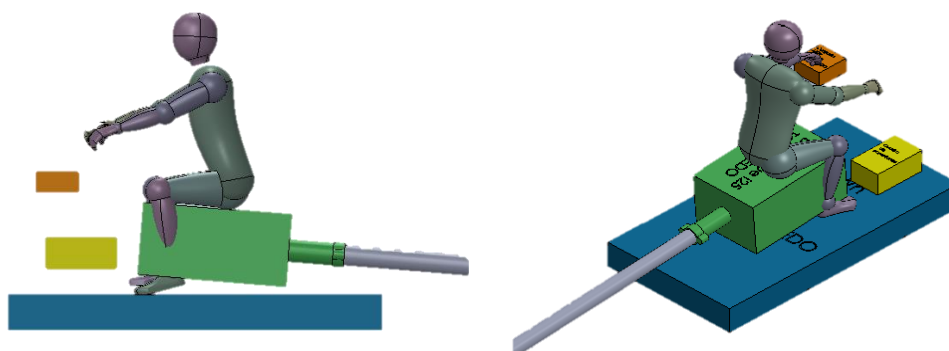


Figura 50. Diseño descartado con sistema Deep Blue de Torqueedo (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 51 se observa el esquema previo de como quedaban la batería y el motor encajados en una Narke GT95. Dadas las dimensiones de la batería BMWi3 y situándola por debajo del motor de forma que el centro de gravedad se mantuviese bajo, se requería de un casco de lomo demasiado ancho para nuestras especificaciones. Además, el motor Deep blue i25, diseñado para embarcaciones de mayor calibre, presentaba dimensiones difíciles de encajar bajo la cubierta del dispositivo.

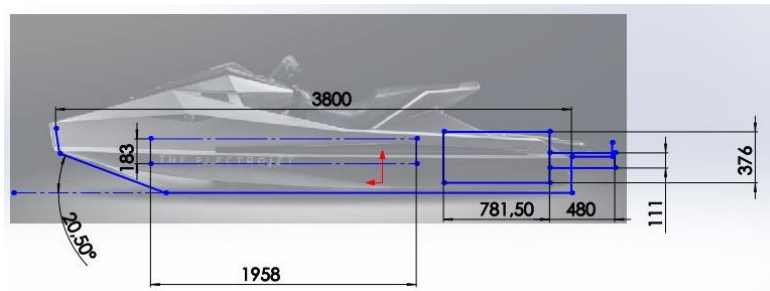


Figura 51. Esquema de disposición de los elementos en diseño con sistema Deep Blue
(Fuente: elaboración propia).

- Diseño con motor Cruise 10.0 FP-SD de Torqueedo

Esta opción, presenta una alternativa viable a ser un dispositivo acuático como el que se plantea diseñar en este proyecto, aproximándose a todas las especificaciones planteadas. En la Figura 52 se muestra este diseño y se describen sus elementos.

Este diseño utiliza el motor Cruise 10.0 FP Sail Drive de Torqueedo alimentado con las baterías 48-5000 de Torqueedo. Contaría con el controlador, los cargadores y el acelerador remoto proporcionados también por la misma compañía.

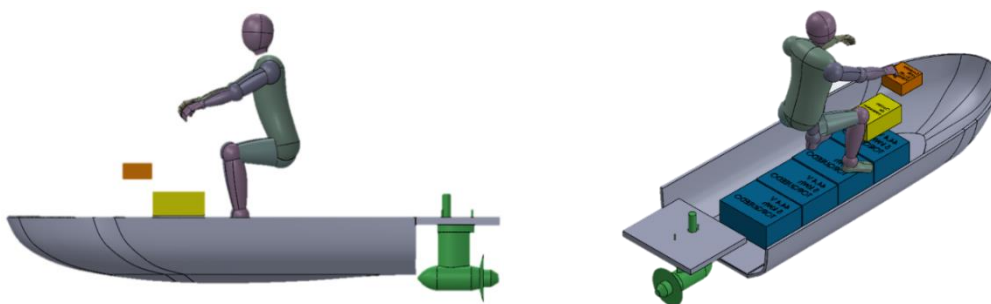


Figura 52. Diseño con motor Cruise 10.0 FP de Torqueedo (Fuente: elaboración propia).

En este caso, teniendo en cuenta la potencia máxima de 5,6 kW que proporciona este motor y aplicando la relación de potencias cúbicas mostrada en el apartado 5.2, con los datos de la Narke, se prevé una velocidad máxima de 27,7 km/h.

$$\text{Relación entre potencias} = \frac{\text{Potencia continua Narke}}{\text{Potencia Cruise 10FP}} = \frac{45}{5,6} = 8,03$$

$$\text{Velocidad máxima} = \frac{55,5}{\sqrt[3]{8,03}} = 27,7 \text{ km/h}$$

Esta velocidad entraría en el límite de las especificaciones deseadas, con lo que se constata que podría ser una opción interesante a desarrollar.

La razón por la que esta opción se ha dejado de trabajar, ha sido el encontrar otra opción que satisficiera las especificaciones de forma más contundente desde un inicio.

Los aspectos y elementos en esta opción que han influido en descartarla para este proyecto, y que han sido suplidas en el diseño final, se exponen a continuación.

Sistema de dirección: El motor Cruise 10FP es un motor tipo POD fijo, es decir, no consta de giro azimutal. Esto supone que se debía pensar en la incorporación de un timón al diseño para poder maniobrar.

Practicidad en el desembarco: Este tipo de motores, diseñados esencialmente para usarse como alternativa de propulsión en barcos de vela, no suelen presentar problemas por sus dimensiones. Un barco a vela tiene elementos como la orza, que superan la dimensiones del POD. Además, está pensado para barcos que no salen del agua después de cada uso o que no llegan hasta la orilla en sus recorridos, por lo que nunca supone un estorbo.

Al aplicarlo a una embarcación menor, cómo una moto acuática, con la que sí es habitual llegar hasta la orilla, encontramos que este motor resulta un apéndice en la embarcación que aumenta en consideración el calado. Esto dificulta la entrada a la orilla desde el mar, pues habría que cuidar de no dañar el motor con el fondo al quedar sin profundidad suficiente.

Posición del motor: Los motores Sail drive están pensados para ir sujetos al casco de la embarcación, usualmente cerca de la popa. Además, para que el motor funcione en condiciones correctas, la hélice debe ir totalmente sumergida.

Solucionar que el motor se pudiese colocar de forma que proporcionase una propulsión correcta y su longitud no afectara a la practicidad de la embarcación para llegar a la orilla requería de dos acciones posibles: modificar el casco de forma que el motor asomase lo mínimo posible por debajo de este, intentando mantener un calado mínimo, o considerar que el motor pudiese elevarse mediante algún mecanismo al acercarse a la orilla para evitar que chocase contra el fondo.

Seguridad: Tanto la modificación del casco, como la elevación del motor se podrían haber resuelto de forma que se garantizase la protección de los elementos eléctricos frente al agua, dejando estanco el casco con soluciones conocidas. Aun así, al tratarse de un motor POD, todo el motor hubiese quedado desprotegido. En otras embarcaciones más grandes, como se comentaba en el punto de practicidad, este queda sumergido y es difícil acceder a él. En el caso de una moto acuática, si esta se encuentra varada en la orilla, el motor quedaría en una posición muy accesible para posibles manipulaciones o robos.

5.3.2 Diseño con componentes de la compañía Bellmarine

A continuación, se procede a explicar la opción escogida para el desarrollo, presentando las ventajas que supone frente a las otras opciones planteadas. Este diseño integra el motor Drive Master de Bellmarine.

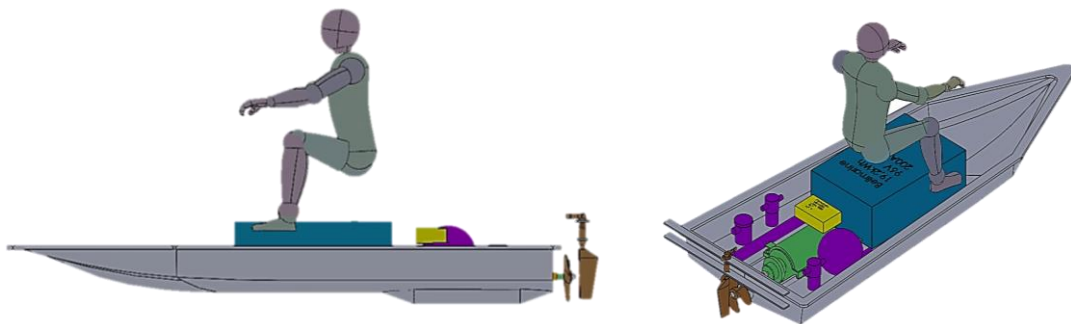


Figura 53. Diseño con motor Drive Master de Bellmarine (Fuente: elaboración propia).

En este diseño, se utiliza el motor Drive Master de Bellmarine alimentado por una batería de 19,2 kWh de la misma empresa. Con esta batería se conseguiría una autonomía de una hora si se navega a máxima potencia. La velocidad nominal máxima se prevé de 38,5 km/h.

$$\text{Relación entre potencias} = \frac{\text{Potencia continua Narke}}{\text{Potencia nominal Drive Master}} = \frac{45}{15} = 3$$

$$\text{Velocidad nominal máxima} = \frac{\text{Vel. crucero Narke}}{\text{Factor}} = \frac{55,5}{\sqrt[3]{2,25}} = 38,5 \text{ km/h}$$

La autonomía, por el factor cúbico de la potencia, en relación a la variación de la velocidad, se vería considerablemente aumentada al disminuir la velocidad de avance, pudiendo aumentar el rango de recorrido.

En este caso, además del controlador, el acelerador remoto y el display, Bellmarine también ofrece varios de los elementos mecánicos necesarios para la propulsión como el eje de la hélice, el acoplador al eje del motor y la propia hélice.

Seguidamente, se exponen los mismos aspectos que en el diseño anterior para describir las ventajas que supone este diseño frente a la opción de Torqueedo.

Sistema de dirección: En este caso, el motor Drive Master acopla mediante un eje la hélice que genera la impulsión. Este sistema también es fijo, por lo que, de igual modo, se debía pensar en la incorporación de un timón al diseño para poder maniobrar. Esto no presenta una ventaja, pero tampoco una desventaja, dado que existen más referentes de embarcaciones con hélice que con motores POD.

Practicidad en desembarco: Dado que con esta solución no existen apéndices en el casco, la llegada a la orilla es mucho más sencilla. Se puede observar en la Figura 53 que la hélice queda protegida en la llegada a la orilla por el casco, puesto que el casco es el punto con más calado de la embarcación.

Posición del motor: En comparación con las dimensiones de un motor POD, la solución adoptada solo nos presenta la limitación de dimensiones que tiene la hélice. Para que funcione correctamente esta debe ir totalmente sumergida, esto es más sencillo de solucionar dado que no hay que preocuparse por apéndices del motor.

Para solucionar que la hélice quede totalmente sumergida, y mantener alineación con el eje del motor, evitando utilizar otros elementos mecánicos, se ha modificado el casco creando un alojamiento para el motor.

Este alojamiento, aparte de contener el motor, tiene la función de ayudar a mantener el rumbo, como si de una aleta se tratara. Presenta el punto de máximo calado de la embarcación. Como se ha comentado anteriormente, esto protege a la hélice de chocar contra el fondo al llegar a la orilla, así no hay que tener en cuenta la necesidad de levantar el motor en la llegada a costa como en la opción de Torqueedo.

Seguridad: Con este diseño, los componentes eléctricos quedan protegidos frente al agua quedando estancos dentro del casco. En el diseño final, al describir el sistema de impulsión en detalle, se verá la forma en que el casco queda estanco en la salida del eje de la hélice a través de la popa.

El motor Drive Master de Bellmarine es un motor intraborda, eso supone que queda situado en el interior de la embarcación. Al exterior solo asoma un trozo del eje de la hélice con esta al final. Esto hace que el motor no quede expuesto a posibles manipulaciones o robos siendo una ventaja frente al motor POD de Torqueedo.

Adicionalmente, este motor proporciona algo más de potencia de propulsión que el motor Cruise 10.0 FP de Torqueedo, y tiene unas dimensiones aceptables para trabajar con él, con lo que presenta una solución a las especificaciones de autonomía y velocidad muy acertada.

6 Diseño detallado

En este apartado se presenta el diseño final del dispositivo acuático eléctrico y una variante previa. Ambos se desarrollan a partir del diseño que integra los componentes de la compañía Bellmarine visto en el apartado 5.3.2.

No se llega a realizar un diseño detallado completo porque los componentes no se acaban hasta la última cota ni se realizan planos del modelo.

A continuación, se presentan los dos diseños, primero la variante, describiendo los elementos que la diferencian del diseño final y después el diseño final.

6.1 Variante del diseño final

Durante el proceso de desarrollo del diseño final se realizó una primera versión que se muestra en la Figura 54.

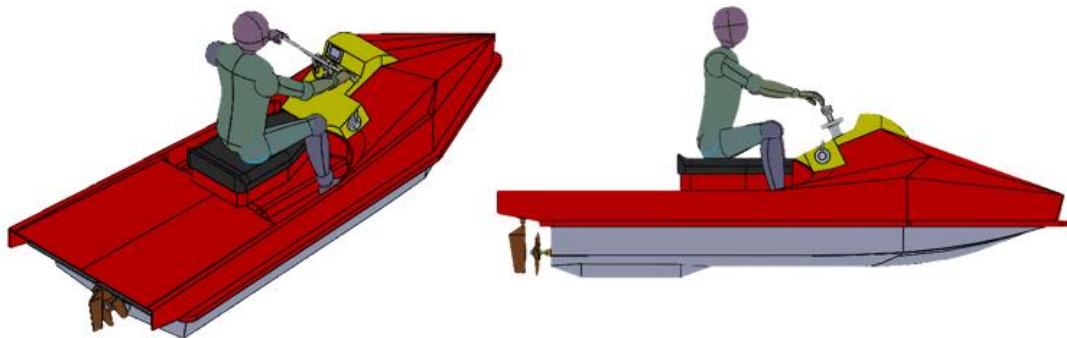


Figura 54. Variante del diseño final (Fuente: elaboración propia).

Esta primera variante presenta las mismas características y elementos que el diseño final, pero difiere en la carrocería. A continuación, se describe la carrocería de esta primera versión y se exponen las problemáticas que se han solucionado de ella en el diseño final.

- Carrocería de la variante del diseño final

La carrocería de esta primera variante, inspirada en la carrocería de la Narke GT95, presenta una estética afilada. Está compuesta por la propia carrocería, por la pieza salpicadero, la estructura del sillón, y el sillón, como se aprecia en la Figura 55.

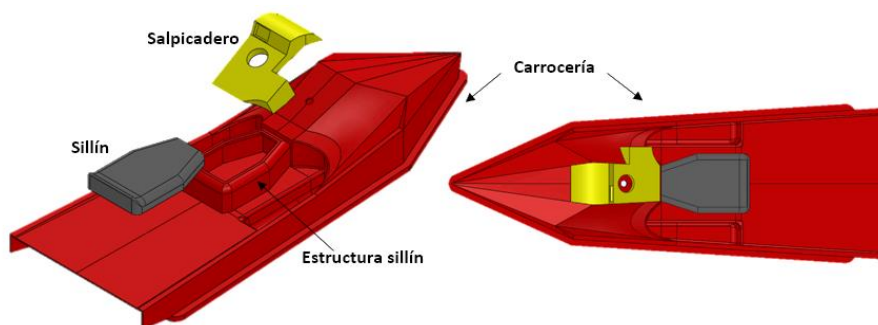


Figura 55. Carrocería de la variante del diseño final (Fuente: elaboración propia).

Empezando por la proa de este conjunto, encontramos el salpicadero, elemento que sirve de alojamiento y soporte para el display, el acelerador y la columna de dirección, piezas que se describirán en el diseño final.

A continuación, se encuentra la estructura que soporta al sillín. Esta estructura es hueca y sirve de espacio para almacenaje de útiles.

A los laterales del sillín se encuentran dos rebajes en la carrocería, los reposapiés, que tienen el fin de servir de plataforma para situar los pies durante la navegación.

La carrocería presenta una popa espaciosa y amplia para disfrute del usuario, permitiendo un uso del dispositivo ocioso, recreativo o relajante. En su parte final, sobresale del casco para poder servir de soporte al timón.

- Problemáticas de la carrocería

Tras analizar el modelo realizado se encontraron dos características susceptibles de ser mejoradas en un nuevo diseño.

La primera es que, al ser una sola pieza, es necesario desmontar la carrocería entera para alcanzar el interior de la moto. Esto no resulta muy práctico para realizar comprobaciones rápidas del estado de sus componentes.

La segunda es que la situación de la batería en el interior de la moto, hace que los reposapiés queden demasiado desplazados hacia los laterales de la carrocería, forzando una postura poco confortable para el piloto.

En el diseño final estos dos aspectos han sido solucionados creando una nueva carrocería para el dispositivo.

6.2 Diseño final del dispositivo acuático eléctrico

En el siguiente apartado se describe detenidamente el diseño final del dispositivo acuático eléctrico.

Con este fin, se divide el conjunto total del diseño final, en tres subconjuntos. Siguiendo el mismo esquema que en el apartado 3.2.2, los subconjuntos son: casco y carrocería del diseño final, sistema de impulsión del diseño final y sistema de dirección del diseño final.

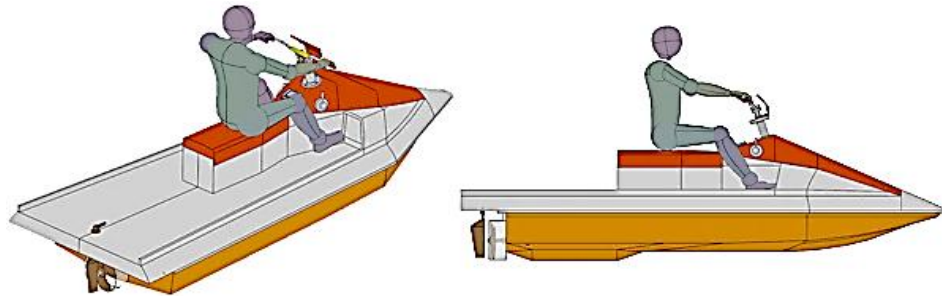


Figura 56. Diseño final (Fuente: elaboración propia).

A continuación, se presenta cada subconjunto y se describen sus piezas y elementos.

Casco y carrocería del diseño final

El diseño del casco se ha realizado aunando las propiedades deseadas de cada tipo de casco vistos en la descripción de la arquitectura de las motos convencionales en el apartado 3.2.2.. Se ha realizado de la siguiente manera.

En la proa, el casco presenta un ángulo de astilla muerta elevado para ganar en confort. El casco, en lugar de golpear llanamente contra el oleaje, lo corta, evitando así sacudidas bruscas. También en la proa, consta de aristas invertidas para disminuir las salpicaduras y propiciar su elevación.

Según avanza el casco, el ángulo de astilla muerta va reduciéndose, acercándose al casco plano en la popa. Esto dota a la embarcación de mayor estabilidad y facilidad para el planeo, aunque no llegue al régimen de planeo.

En la parte inferior de la popa, se observa una protuberancia (Figura 57). Esta, contiene el motor y como se ha explicado con anterioridad, hace la función de aleta para ayudar a mantener el rumbo fijado y conseguir un mejor *tracking*.

Finalmente, para la mejor maniobrabilidad, sobre todo en los giros, las aristas del casco se han redondeado, creando aristas suaves, de forma que proporcionan más inclinación en el giro y con ello una trayectoria más fluida.

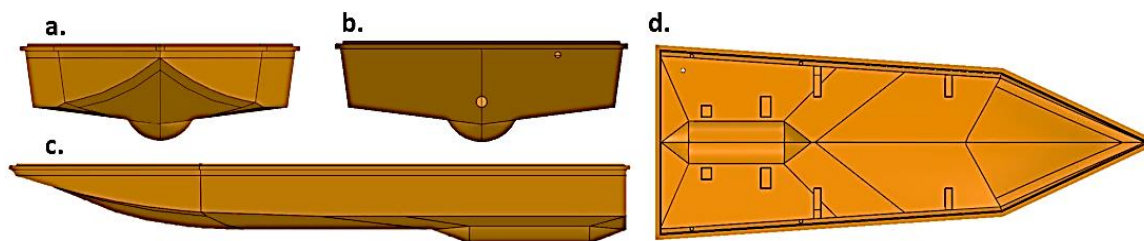


Figura 57. Vistas del casco. a) frontal, b) posterior, c) lateral, d) planta (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 57 d, se aprecian unos salientes dentro del casco sobre los que van sujetos, la estructura que da soporte a la batería y al controlador (Figura 58) y el motor escogido, elementos que se describen más adelante.

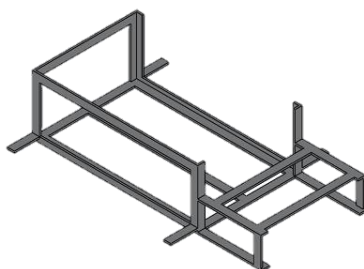


Figura 58. Estructura para sujetar batería y controlador (Fuente: elaboración propia).

La carrocería del diseño final está compuesta por tres elementos principales. La cubierta, los carenados y el sillín.

La cubierta es la pieza que se monta al casco y sostiene los demás elementos. Es dónde el piloto se situará para controlar el dispositivo.

En la Figura 59 se aprecia que cuenta con dos aperturas, una en la proa y otra en la zona del sillín, para poder alcanzar el interior del casco sin necesidad de desmontarla.

La apertura de proa permite alcanzar la zona de la parte delantera del casco y hacer hueco para el sistema de dirección. La apertura del sillín, permite alcanzar las conexiones entre la batería, el motor y el controlador, elementos que se describirán en el subconjunto sistema de impulsión del diseño final.

En popa, la cubierta sobresale del casco y se le observa un orificio que tiene la función de albergar la pieza alojamiento del timón, que se describirá en el subconjunto sistema de dirección del diseño final.

Los carenados en la carrocería son dos. El primero sirve para tapar la apertura de proa de la cubierta y a la vez soportar las piezas alojamiento del eje de dirección, display y acelerador,

que se describen más adelante en el subconjunto sistema de dirección del diseño final, haciendo también la función de salpicadero.

El segundo carenado, carenado del manillar, se acopla a la pieza eje de dirección, que se verá en el sistema de dirección del diseño final.

El sillín cubre la apertura que presenta la cubierta en la zona del sillín, sobre la que va sentado el piloto.

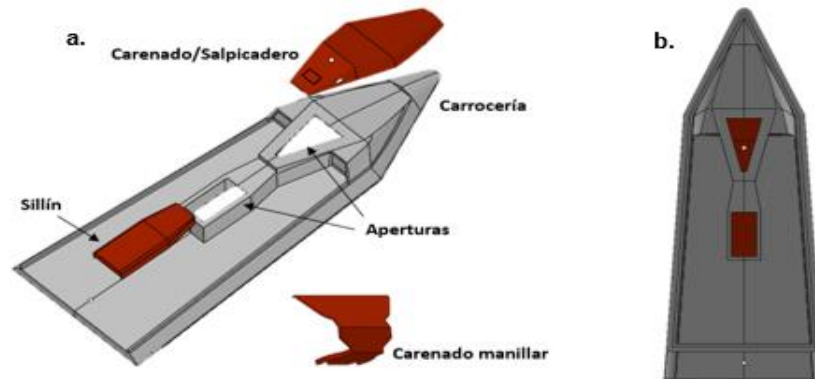


Figura 59. Carrocería del diseño final. a) vista explosionada, b) vista inferior (Fuente: elaboración propia).

El casco y la carrocería quedan sellados de la siguiente manera: la carrocería consta con un borde saliente en forma de escalón que encaja en el borde del casco. Entre los dos elementos se encaja una junta selladora y se aprisionan mediante pernos.



Figura 60. Capas en el montaje del casco y carrocería (Fuente: elaboración propia).

Sistema de impulsión del diseño final

El sistema de impulsión es parecido al que se usa convencionalmente en las embarcaciones con hélice. Los elementos que lo componen, mostrados en la Figura 61, son, de izquierda a derecha: la batería, el controlador, el motor Drive Master, el eje de la hélice, la junta selladora, el tubo de popa, la hélice con su ánodo, el display y el acelerador.

Se expone cada uno de ellos por separado.

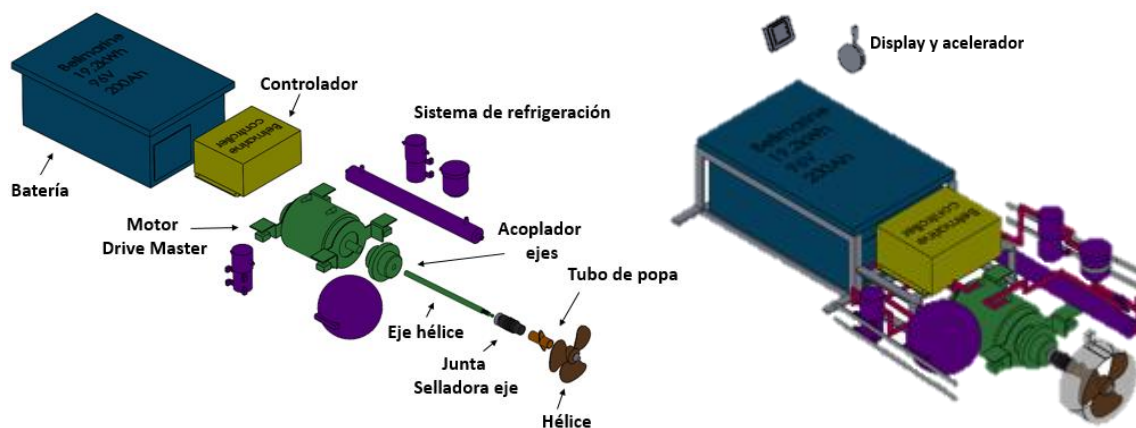


Figura 61. Vista explosionada y conjunto en layout de los elementos del sistema de impulsión del diseño final (Fuente: elaboración propia).

- Batería

La batería utilizada en el diseño final está proporcionada por Bellmarine, misma compañía que proporciona el motor Drive Master. A través del controlador alimenta al motor con la energía necesaria en cada momento. Su capacidad es de 19,2 kWh con un voltaje de 96V, como se puede observar en sus especificaciones en la Tabla 3.

Es una batería de LiFePO4 basada en celdas de fosfato de hierro y litio. Contiene un BMS integrado para mantener correctamente la eficiencia de las celdas y está construida en acero con protección IP65 (protección completa contra el polvo y contra chorros de agua). [20]

| Energy kWh | Arquitectura | Dimensiones de un elemento | Número de módulos | Peso total |
|------------|------------------|----------------------------|-------------------|------------|
| 19.2 | Un solo elemento | 585x900 h355mm | 1 | 220 kg |

Tabla 3. especificaciones generales de la batería de Bellmarine.

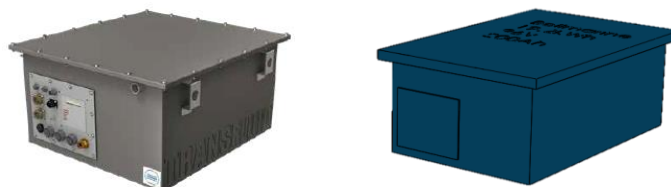


Figura 62. Batería Bellmarine y modelo CAD (Fuente: Bellmarine catalogue, elaboración propia).

- Controlador

De la compañía Bellmarine, se encarga de mantener un correcto funcionamiento del motor proporcionándole la energía necesaria, proveniente de las baterías, según la velocidad y la potencia que se desee alcanzar. Además, recoge datos de la velocidad y posicionamiento, entre otros, gracias a un GPS para transmitirlos al piloto a través de una pantalla. [20]

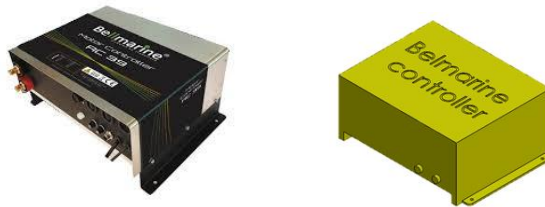


Figura 63. Controlador de Bellmarine y modelo CAD (Fuente: Bellmarine catalogue, elaboración propia).

- Motor Drive Master

Elemento que transforma la energía eléctrica en energía mecánica para proporcionar el par y la potencia necesarias para mover el dispositivo acuático. También de la compañía Bellmarine, el motor Drive Master proporciona una potencia nominal de 15kW, como se ha observado anteriormente en su tabla de especificaciones de la Figura 38. El motor Drive Master se refrigera por líquido mediante un circuito cerrado, de este modo puede navegar tanto por agua dulce como por agua salada. [20]

A través del acoplador y el eje de la hélice transmite el movimiento rotatorio a la hélice.

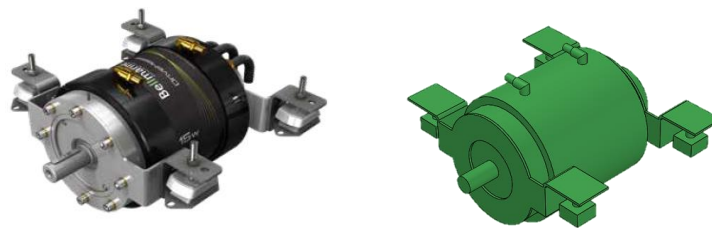


Figura 64. Motor Drive master Bellmarine y modelo CAD del modelo de motor escogido (Fuente: Bellmarine catalogue, elaboración propia).

- Eje de la hélice

Unido al motor a través de un acoplador, el eje de la hélice transmite el movimiento rotatorio del motor a la hélice. Mecanizado en Acero Inoxidable SS316. [20]

En su extremo, el opuesto al motor, consta con unas ranuras dentadas para acoplarle la hélice y que esta quede correctamente sujeta, evitando que deslice un elemento sobre el otro.

Además, el extremo termina en rosca, para roscar el ánodo, cerrando el montaje.



Figura 65. Eje de la hélice (Fuente: elaboración propia).

- Junta selladora del eje (PSS)

Elemento que previene de la entrada de agua, al interior de la embarcación, a través del tubo de popa.

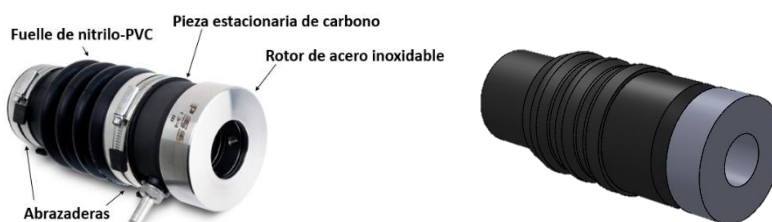


Figura 66. Junta selladora del eje y modelo CAD (Fuente: PYI catalogue, elaboración propia).

Fabricada por PYI inc., la junta selladora PSS está formada por tres elementos, el rotor de acero inoxidable, la pieza estacionaria de carbono y el fuelle.

La superficie de sellado se crea entre las superficies planas del rotor de acero inoxidable y la pieza estacionaria de carbono. La pieza de carbono va unida al fuelle y este a su vez va encajado y asegurado con abrazaderas al tubo de popa. El rotor comprime el fuelle, creando una precarga, antes de ser asegurado al eje de manera que las caras del rotor y la pieza de carbono mantienen contacto constante compensando el movimiento hacia adelante y hacia atrás debido al empuje de la hélice. La pieza de carbono está sobredimensionada al eje y así compensa la mayoría de problemas de desalineación del eje. [24]

- Tubo de popa

El tubo de popa es una carcasa de bronce que funciona como buje conteniendo el eje de la hélice. En su interior hay una funda con un cojinete de goma hexagonal que permite que el agua entre, entre el cojinete y el eje de la hélice, para refrigerarlo y lubricarlo. [25]



Figura 67. Tubo de popa y modelo CAD (Fuente: scammarine.com, elaboración propia).

- Hélice

Elemento mecánico de bronce, situado al final del eje de la hélice, que al girar sus tres aspas genera la impulsión necesaria para mover el dispositivo. El movimiento rotatorio le es transmitido desde el motor y a través del eje de la hélice, al que va acoplada.

Un orificio dentado atraviesa por el centro de la hélice para permitir la unión en el extremo del eje de la hélice. En la Figura 68 vemos su montaje, basado en el montaje que usa Torqueado, dónde una vez acoplada la hélice se fija mediante una tuerca almenada y una chaveta para evitar que se afloje la unión. [26]

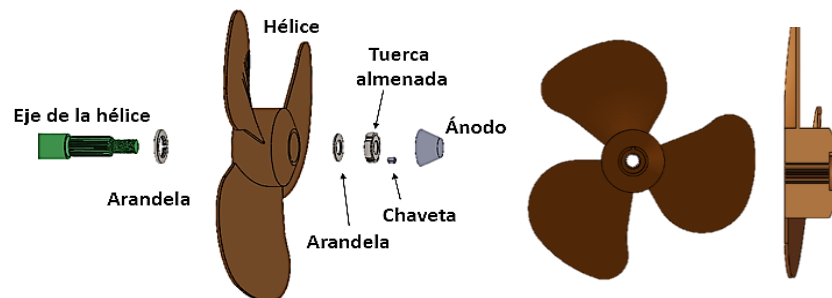


Figura 68. Montaje de la hélice en el eje y hélice (Fuente: elaboración propia).

- Ánodo de zinc

Pieza situada al final del eje de la hélice que tiene la función de hacer de tope para la hélice y evitar que la corrosión ataque a los demás componentes, como por ejemplo la hélice, y haga mella en ellos. Se acopla al eje mediante rosca. El ánodo es de zinc, por su uso en agua salada.

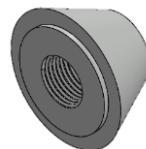


Figura 69. Ánodo de Zinc (Fuente: elaboración propia).

- Acelerador y display

El acelerador electrónico controla la potencia que da el motor en cada momento permitiendo controlar la velocidad. También permite controlar el sentido de la marcha, puesto que puede controlar el sentido de giro del motor y por tanto, el sentido de giro de la hélice, permitiendo de este modo la marcha adelante o la marcha atrás.

En el display podemos leer información útil para el piloto como, entre otras cosas: la velocidad de avance, el estado de las baterías, la potencia del motor o la temperatura del motor.



Figura 70. Acelerador, display y modelos CAD (Fuente: Bellmarine catalogue, elaboración propia).

- Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración refrigera, tanto el motor como el controlador, con agua. Dado que ni el motor ni el controlador son resistentes al agua salada, se ha escogido un sistema de refrigeración de ciclo cerrado para poder navegar tanto en aguas dulces como en aguas saladas.

El esquema del sistema de refrigeración, proporcionado por Bellmarine, se muestra en la Figura 71, junto con sus componentes. Está formado por una bomba de circulación y una bomba autocebante de la marca europump, un intercambiador de calor tamaño L, dada la potencia que alcanza el motor seleccionado, una entrada y una salida de agua para el casco, una válvula de bola, un filtro de agua de bronce, un vaso de expansión y una manguera de cinco metros con abrazaderas. [20] [27]

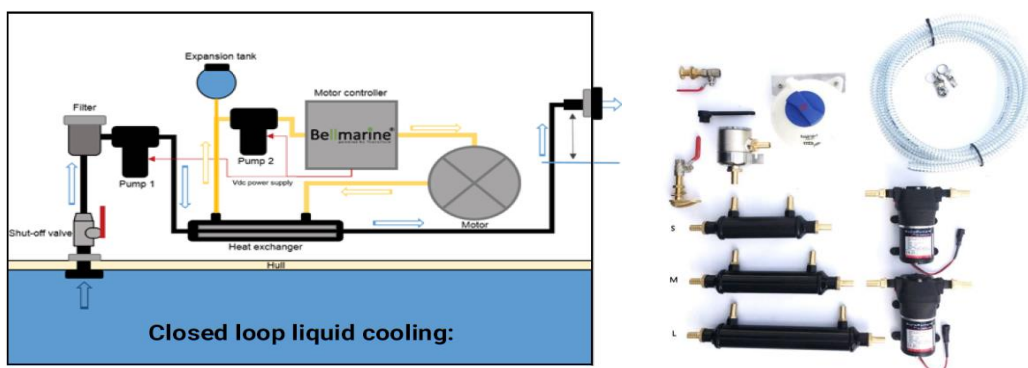


Figura 71. Esquema del circuito cerrado de refrigeración y componentes (intercambiador de varias tallas) (Fuente: Bellmarine catalogue).

Sistema de dirección del sistema final

El sistema de dirección es el que permite orientar al dispositivo acuático hacia cualquier rumbo deseado y le permite maniobrar. Los elementos que lo forman, mostrados en la Figura 72, son, de izquierda a derecha y de arriba abajo, el manillar, la columna de dirección, el alojamiento del eje de dirección, los cables de dirección, la paleta del timón, el alojamiento del timón, el soporte del alojamiento del timón y el timón.

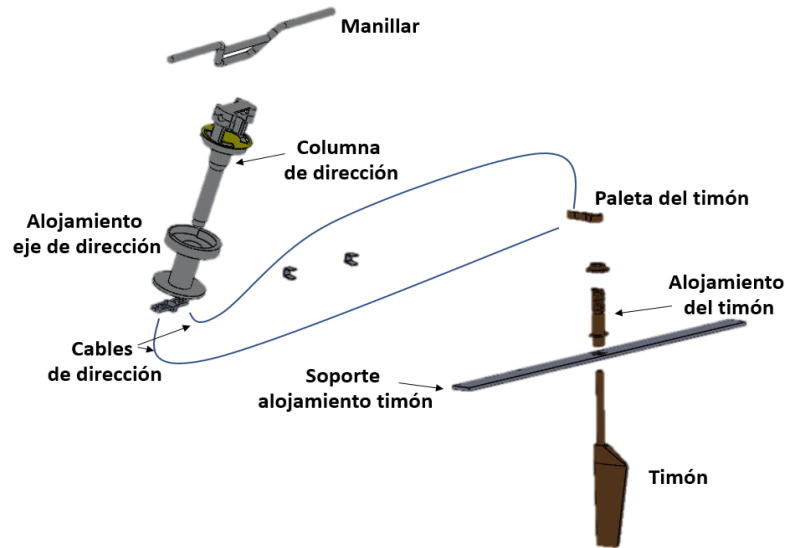


Figura 72. Elementos del sistema de dirección del diseño final (Fuente: elaboración propia).

- Manillar

Sirve para girar el eje de dirección y con ello girar también el timón. Es la pieza que permite al piloto dirigir el dispositivo.

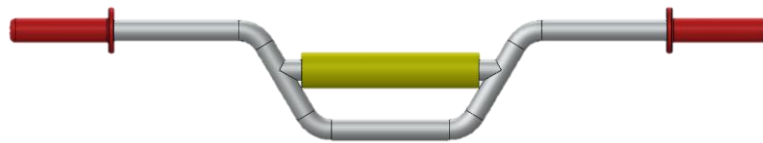


Figura 73. Manillar del sistema de dirección (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 73 se observa que el manillar lleva añadidos unos manguitos, para que el piloto tenga una sujeción más firme y fiable del manillar y un protector en su barra central.

- Columna de dirección

Formada por el eje de dirección, el tope de la columna de dirección y el acoplador del cable de dirección, transmite el movimiento realizado por el manillar a través del cable de dirección hasta la paleta del timón, conectada al timón para orientarlo.

En la Figura 74 se aprecia en el eje de dirección una pequeña muesca (marcada en naranja), que hará de tope con la pieza alojamiento columna de dirección, de la que se habla a continuación. También se muestran las tres piezas que conforman la columna de dirección.

El acoplador del cable de dirección está diseñado de forma que se pueden conectar dos cables de dirección, y se sujeta al eje de dirección mediante un tornillo que lo aprieta con fuerza impidiendo que se desplace.

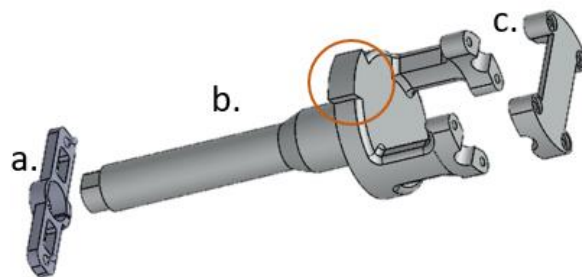


Figura 74. Componentes columna dirección. a) Acoplador cable de dirección, b) Eje de dirección, c) Tope de la columna de dirección (Fuente: elaboración propia).

El tope de la columna de dirección, junto con la parte alta del eje de dirección hacen de sujeción para el manillar aprisionándolo mediante tornillos.

Este conjunto se basa en el sistema Riva Racing de Yamaha. [28]

- Alojamiento columna de dirección

Esta pieza envuelve al eje de dirección, sirviéndole como protección y sujeción. En su parte superior, dónde encaja la columna de dirección, tiene una cavidad diseñada para que haga tope con la muesca del eje dirección y así evitar que el manillar pueda girar más de lo necesario, en la Figura 75 se muestran los puntos donde hace tope, marcado en naranja, así como la tapa del alojamiento.



Figura 75. Alojamiento columna de dirección y tapa del alojamiento (Fuente: elaboración propia).

Al alojamiento se le incorpora una tapa, atornillada, para evitar que el eje de dirección salga de este. La tapa dispone de unas ranuras que dejan girar a través de ella al eje de dirección.

- Cables de dirección

Elementos que sirven para transmitir el giro de la columna de dirección hasta la paleta del timón.

Conectado en su inicio al acoplador del cable de dirección y en su final a la paleta del timón, queda, además, sujeto tanto en su inicio como en su fin, a la carrocería del dispositivo. En cada uno de sus extremos cuenta con un pistón que se desliza para empujar o tirar del elemento al que esté acoplado.

- Paleta del timón

Pieza de acero inoxidable que recibe los pistones finales de los cables de dirección.

La paleta del timón va sujeta al timón mediante tornillos de sujeción de modo que es capaz de transmitirle el movimiento que recibe del cable de dirección.

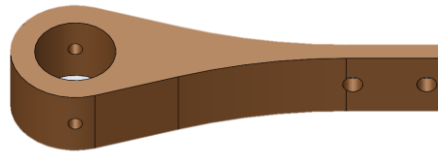


Figura 76. Paleta del timón (Fuente: elaboración propia).

- Alojamiento del timón

Esta pieza hueca contiene el tallo del timón y lo mantiene a la altura correcta para que funcione eficientemente. Basado en los productos de la compañía Italian Propellers. [29]

Su parte superior se sujeta por una pieza roscada que hace de tope con la cubierta, evitando que caiga, y su parte inferior está sujeta a un soporte mediante dos pernos.

El timón se mantiene en su interior gracias a que la pieza paleta del timón, unida al tallo del timón, hace tope con la pieza roscada que sujeta la parte superior de la pieza alojamiento del timón.



Figura 77. a) Alojamiento del timón y pieza tope. b) Montaje del timón en el alojamiento (Fuente: elaboración propia).

- Soporte del alojamiento del timón

Esta pieza tiene la función de sujetar la pieza alojamiento del timón, que a su vez sujeta al timón. Va sujeta a la carrocería, en la parte de popa que sobresale del casco.

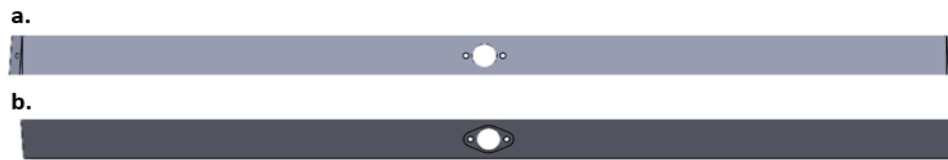


Figura 78. Soporte para el alojamiento de timón. a) vista superior, b) vista inferior
(Fuente: elaboración propia).

- Timón

Elemento que redirecciona la corriente de agua creada por la hélice de manera que el dispositivo gire hacia donde el piloto desea. El diseño se basa en los timones de codaste, utilizados en la gran mayoría de embarcaciones, situado en la popa del barco. [29]

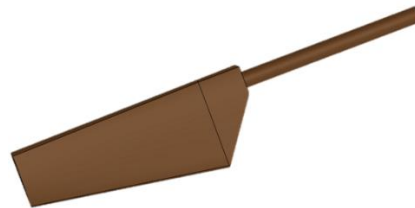


Figura 79. Timón del diseño final (Fuente: elaboración propia).

La fuerza del timón es un aspecto importante a tener en cuenta puesto que es un parámetro clave para que este sea efectivo. Conociendo la fuerza que deberá soportar, podemos conocer el área necesaria de la pala del timón y dimensionarlo correctamente. Una de las fórmulas más utilizadas para el cálculo de la fuerza del timón es la de Baker y Bottomley, para timón en el centro y a popa de la hélice, como es nuestro caso. La ecuación es la siguiente, donde A = área del timón en m^2 , v = velocidad en ms^{-1} . θ = grados de metida del timón, que es cuánto puede, el timón, cerrarse contra la popa. [30]

$$F = 18 * A * v^2 * \theta \text{ (Newtons)}$$

Ecuación 3. Ecuación de Baker y Bottomley.

Al conocer la fuerza del dispositivo calculada con la potencia del motor y la velocidad máxima de la embarcación, la velocidad máxima de la embarcación y el ángulo de metida máximo con el que se consigue una evolución más efectiva, considerado de 35 grados, podemos extraer el área necesaria para la pala del timón y dimensionarlo. El área resultante es de 27450 mm^2 . [31]

También se ha tenido en cuenta la posición óptima que debe ocupar en la popa, siguiendo la recomendación de las distancias a las que situarlo de los distintos elementos del dispositivo que lo rodean. En la Figura 80 vemos estos distanciamientos óptimos. [32]

| Distancias de protección de la hélice (% del diámetro de la hélice) | |
|---|--------------------|
| 1. Distancia mínima entre las puntas de la pala y el casco ¹ | 17% |
| 2. Distancia mínima entre las puntas de la pala y la quilla | 4% |
| 3. Distancia mínima entre el dormido de popa y la hélice a un 35% del diámetro de la hélice | 27% |
| 4. Distancia máxima entre la hélice y el timón a un 35% del diámetro de la hélice | 10% |
| 5. Distancia máxima al extremo del eje libre | 4xdiámetro del eje |

¹ distancias asociadas al número de palas, calculables como sigue: 1. = 0.23 - (0,02 × n) y 3. = 0.33 - (0,02 × n) donde n = número de palas.

Tabla 4. Distancias de protección de la hélice.

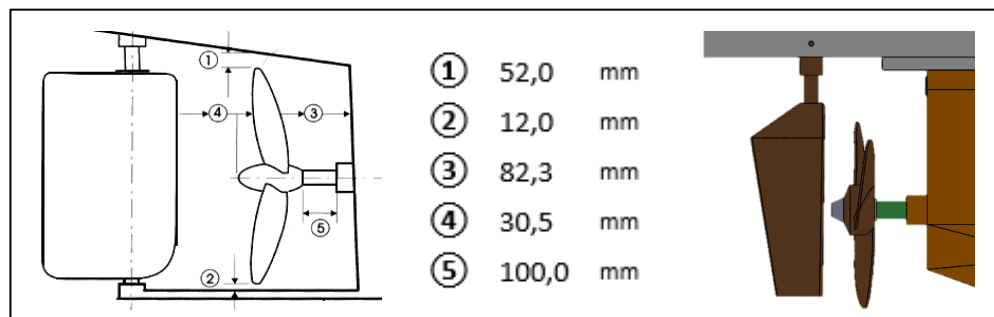


Figura 80 Esquema de distancias, distancias calculadas para el diseño y modelo CAD del diseño final (Fuente: elaboración propia).

7 Comprobaciones finales

En este apartado final se realizan los cálculos de comprobación de flotabilidad, de estabilidad y de deformación del casco. En la flotabilidad se calcula el volumen del casco sumergido cuando el dispositivo soporta diferentes cargas, en el cálculo de estabilidad se comprueba la capacidad de volver a una posición de equilibrio tras ser inclinado y finalmente se comprueba la deformación del casco a causa del peso de sus elementos.

7.1.1 Flotabilidad

La línea de flotación marca el límite entre la obra viva, parte sumergida de una embarcación cuando está en el agua, y la obra muerta, que es la parte de la embarcación que queda fuera del agua.

En este apartado se muestra la línea de flotación del dispositivo para diferentes cargas. Se presenta la línea de flotación sin piloto, con piloto y con piloto más carga.

Para calcular la línea de flotación se aplica el principio de Arquímedes, que como se ha visto con anterioridad anuncia, “Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado” y para que la moto de agua flote, el empuje vertical que recibe debe ser igual al peso de la moto. [11]

Así, conociendo el peso de la moto y la ecuación de la fuerza de empuje (Ecuación 4), podemos conocer el volumen de agua desalojado. O lo que es lo mismo, el volumen del casco sumergido en ella.

$$\text{Empuje} = \text{Volumen} * \rho_{H_2O} * g$$

Ecuación 4. Ecuación del empuje.

Dando un valor de ρ_{H_2O} igual a 1027 kg/m^3 , considerando la densidad como la del agua salada, por la posibilidad de navegar en ella, y un valor de $9,81 \text{ m/s}^2$ a la gravedad, calculando el volumen, se puede conocer la dimensión vertical que lo limita, es decir, la altura del casco sumergida en el agua.

Para encontrar esta altura, a través del software SolidWorks, se ha ido variando la altura del casco hasta hacer coincidir, el volumen del casco, con el volumen de agua desalojado según las condiciones de carga definidas, y así obtener la línea de flotación.

Esto también ha permitido conocer la carga máxima que la moto puede soportar sin hundirse más de lo deseado en el agua, carga llamada peso muerto. [33]

- Línea de flotación sin piloto

La masa de la moto sin piloto extraída del modelo después de haber definido la masa de cada uno de sus elementos, es de 493,31kg.

Mediante la Ecuación 4 y utilizando el software Excel, se calcula que el volumen sumergido es de 0,48m³.

A través de SolidWorks se busca la coincidencia del volumen del casco que iguala los 0,48m³ (Figura 81) y se obtiene que la línea de flotación está situada a 95,5mm de cubierta (Figura 82).

| | |
|-------------------------|-----------|
| Masa total (kg) | 493,31 |
| Peso (N) | 4839,3711 |
| Volumen desplazado (m3) | 0,4803408 |



Volumen = 480594103.01 milímetros cúbicos

Figura 81. Volumen desplazado calculado y volumen del casco sumergido para moto sin piloto (Fuente: elaboración propia).

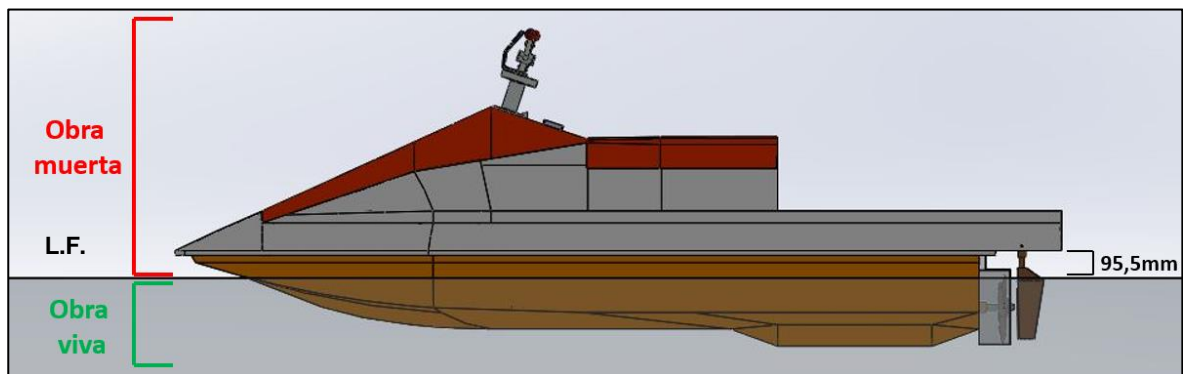


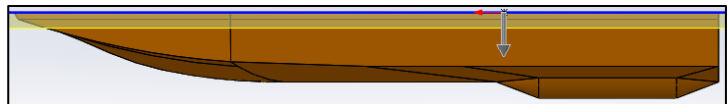
Figura 82. Línea de flotación sin piloto (Fuente: elaboración propia).

- Línea de flotación con piloto

Siguiendo el mismo procedimiento se encuentra el nivel de la línea de flotación cuando la moto lleva a su piloto. En este caso la masa total de la moto más el piloto es de 568,30kg, considerando la masa media de un individuo de 75 kg.

La línea de flotación se sitúa a 69,9 mm de la cubierta. Como se muestra en la Figura 84.

| | |
|-------------------------|------------|
| Masa total (kg) | 568,31 |
| Peso (N) | 5575,1211 |
| Volumen desplazado (m3) | 0,55336904 |



Volumen = 553742644.21 milímetros cúbicos

Figura 83. Volumen desplazado calculado y volumen del casco sumergido para moto con piloto (Fuente: elaboración propia).

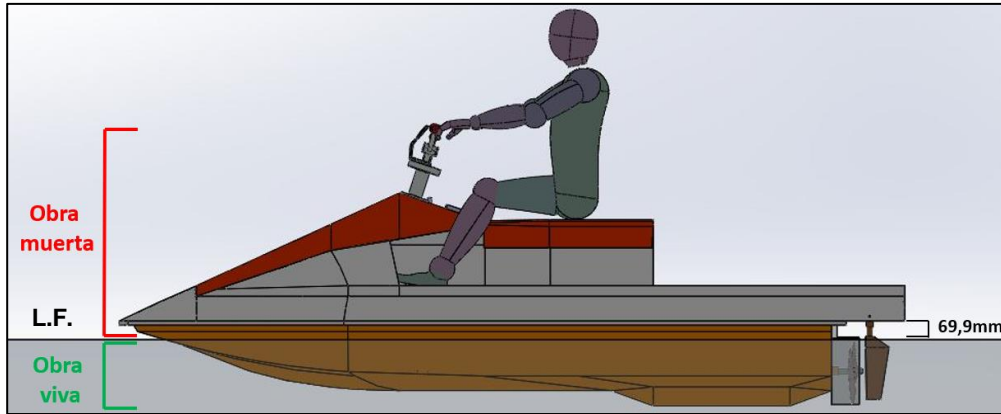


Figura 84. Línea de flotación con piloto (Fuente: elaboración propia).

- Línea de flotación con piloto y peso muerto

Para mantener la junta entre el casco y la carrocería en buenas condiciones, se plantea que esta quede a una distancia de 50mm del agua (Figura 86).

De este modo se sitúa la línea de flotación a 50mm de la cubierta. Esto conlleva que, haciendo los cálculos a través de la Ecuación 4, conociendo el volumen sumergido gracias a SolidWorks, la carga máxima que se puede cargar en la moto es de 57,32 kg, sin contar al piloto, que se supone de una masa de 75 kg. En total, el peso muerto, que es la suma del piloto y la carga adicional máxima, es de 132,32 kg.

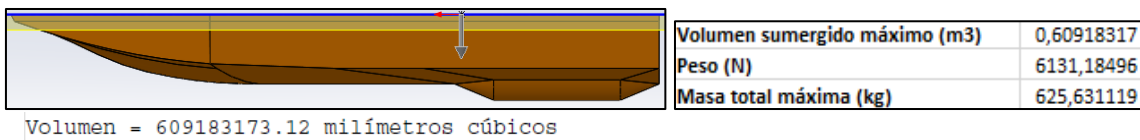


Figura 85. Volumen sumergido con carga máxima y cálculo de la carga máxima absoluta (Fuente: elaboración propia).

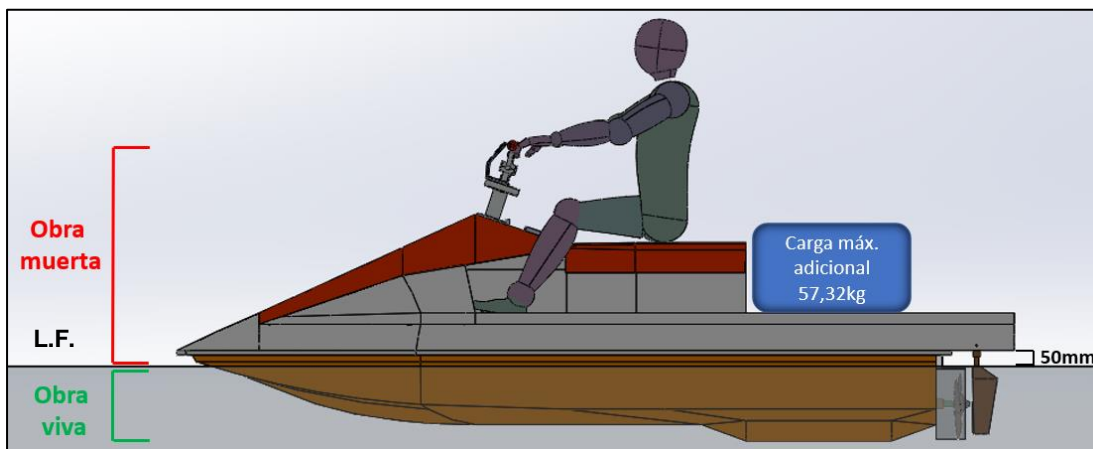


Figura 86. Línea de flotación con carga máxima (Fuente: elaboración propia).

7.1.2 Estabilidad

Para comprobar la estabilidad del dispositivo se requiere de un cálculo gráfico usando la posición del centro de gravedad, el centro de carena y el metacentro.

Centro de gravedad del dispositivo.

El centro de gravedad de un buque ejerce un efecto notable sobre la capacidad de la embarcación para volver a una posición estable. En la siguiente imagen se muestra la posición del centro de gravedad del dispositivo diseñado.

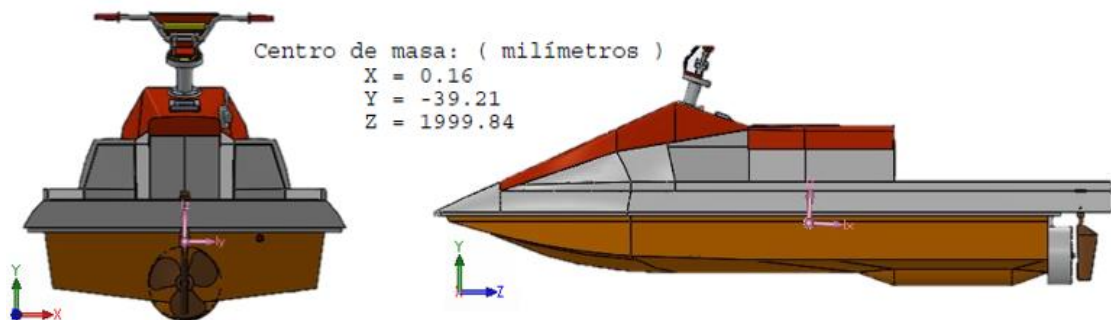


Figura 87. Situación del centro de gravedad (Fuente: elaboración propia).

Centro de carena

El centro de carena es el punto a través del cual el empuje de flotabilidad actúa verticalmente hacia arriba. Se encuentra en el centro geométrico de la sección sumergida del buque.[34]

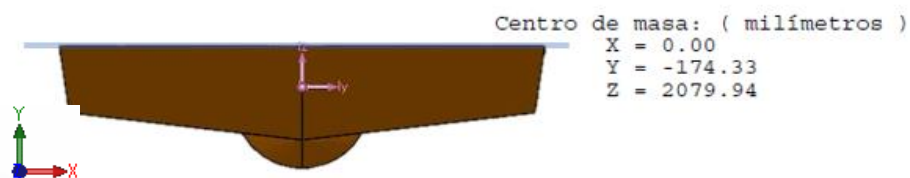


Figura 88. Centro de carena sin escora (Fuente: elaboración propia).

La Figura 89 muestra el centro de carena del dispositivo diseñado cuando presenta una escora, en la que la cubierta llega al nivel del agua, establecida cómo la escora máxima. Se considera el nivel del agua con la línea de flotación en la que hay piloto y no hay carga adicional.

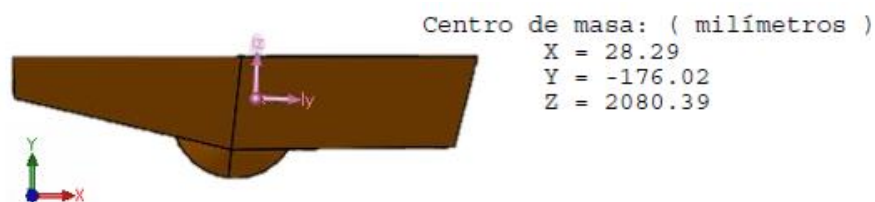


Figura 89. Situación del centro de carena con escora (Fuente: elaboración propia).

Metacentro

Intersección entre el eje formado por el centro de gravedad y centro de carena sin escora, que es la inclinación que adopta la embarcación al tomar curvas o por otros factores externos, y la línea vertical trazada desde el centro de carena cuando existe escora.

En la siguiente imagen se muestra la posición del metacentro, calculada gráficamente, cuando el dispositivo presenta la escora máxima.

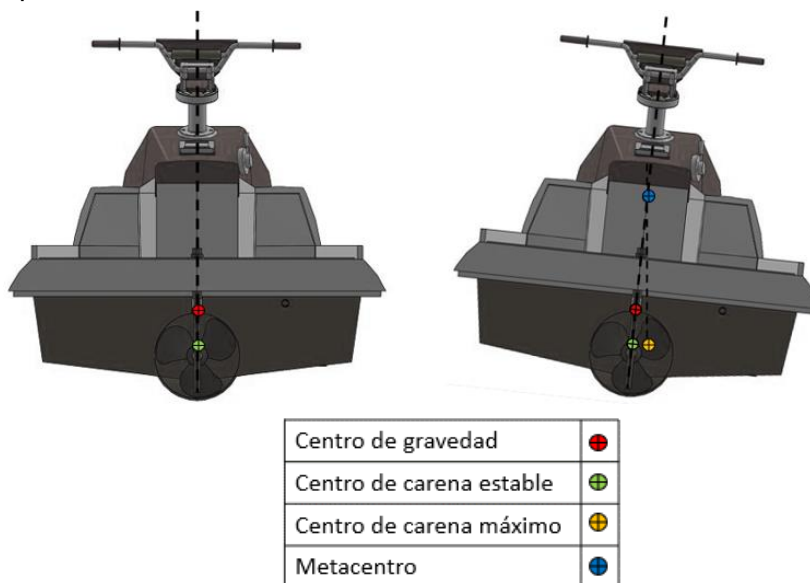


Figura 90. Cálculo gráfico del metacentro con máxima escora (Fuente: elaboración propia).

Estabilidad

La embarcación se considera estable, con la capacidad de volver a su posición original, cuando su centro de gravedad se encuentra por debajo del punto de metacentro, encontrado a una escora determinada. [34]

En la Figura 90, se ha demostrado gráficamente que la condición anterior se cumple, el centro de gravedad queda situado por debajo del metacentro. Por lo tanto, se considera que el dispositivo es una embarcación estable, si no se supera la escora máxima establecida, que es de 6,50 grados.

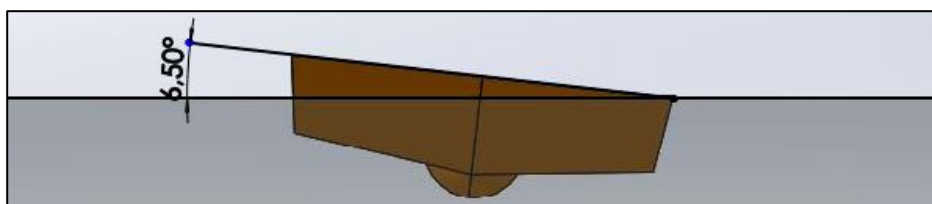


Figura 91. Escora máxima para no hundir la cubierta (Fuente: elaboración propia).

7.1.3 Deformación estructural

Para comprobar la deformación del casco si la moto es levantada del agua, para cargarla en un remolque, por ejemplo, se han realizado dos simulaciones estructurales estáticas desde Ansys Workbench. Una con un casco de 15mm de grosor, y otra con uno de 10mm de grosor.

Para realizar las simulaciones se ha tenido que simplificar la geometría del casco, dado que, al importar el archivo del modelo, el modelador de Ansys generaba aristas de más o entrecruzaba superficies impidiendo generar bien el sólido.

Para simplificar la geometría se ha decidido enfocar el modelado en el fondo del casco, puesto que es la zona dónde se soportan los componentes de la moto en última instancia. La Figura 92 muestra esta simplificación realizada.

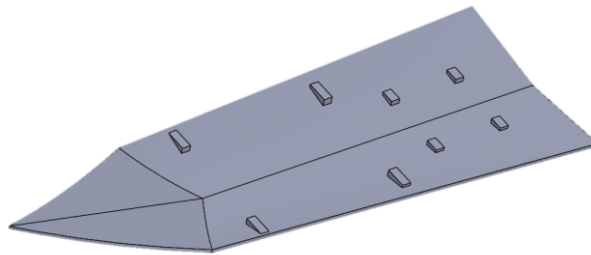


Figura 92. Geometría simplificada del fondo del casco (Fuente: elaboración propia).

Con esta geometría se han realizado las dos simulaciones dándole en cada caso el grosor correspondiente.

Para realizar el análisis estructural se han fijado las aristas de la parte baja del casco.

Las fuerzas se han repartido, de manera simplificada, por cada una de las protuberancias que van a sujetar los soportes de los elementos de la moto, como la batería y el motor.

El resto de los pesos correspondientes a los elementos que no tienen contacto directo con el fondo del casco, se ha repartido alrededor de las aristas externas del casco, dado que ahí es donde se sujetan o donde el casco recibe su efecto en la simplificación.

En la Figura 93 se muestra cómo queda la repartición de las fuerzas del modo mencionado y sus valores, así como los soportes fijos.

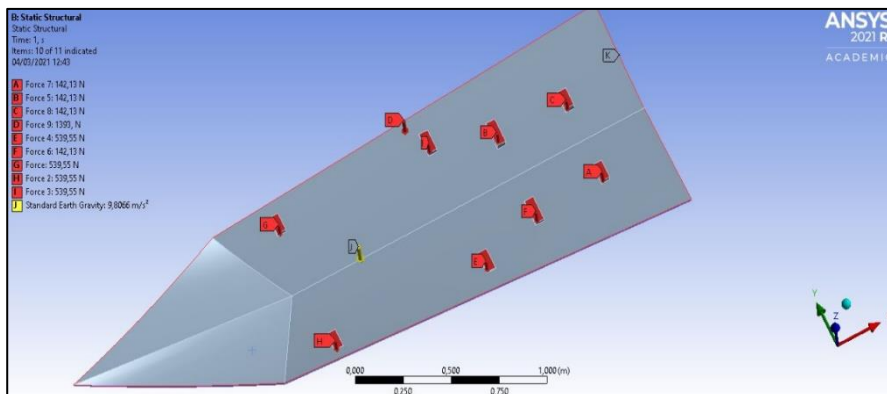


Figura 93. Repartición de las fuerzas para el análisis (Fuente: elaboración propia).

En esta ocasión el mallado se ha generado automáticamente con enfoque en un análisis mecánico.

Al trabajar con la versión estudiante, que tiene un límite de elementos finitos con los que se puede realizar el cálculo, y contar con una geometría algo más compleja debida a las protuberancias del casco sobre la que se sujetan los soportes, el mallado ha resultado siendo de una calidad media. Tras probar varios refinamientos el mallado conseguido ha sido el que se muestra en la Figura 94.

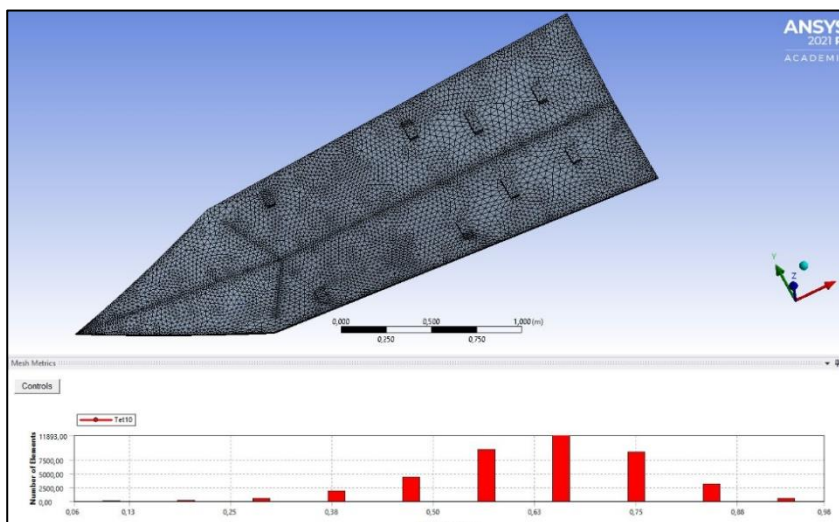


Figura 94. Mallado para el análisis estructural (Fuente: elaboración propia).

- Simulación con el casco de 15mm

El resultado de la deformación total del casco tras esta simulación es de un valor máximo de 0,382 milímetros, inferior a un milímetro, cómo muestra la Figura 95

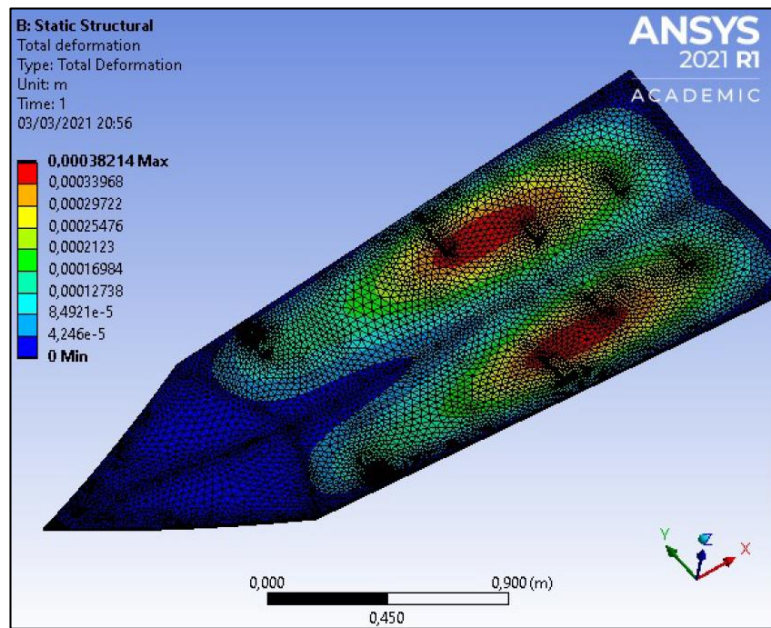


Figura 95. Deformación total del casco de 15mm (Fuente: elaboración propia).

- Simulación casco 10mm.

El resultado de la deformación total del casco tras esta simulación es de un valor máximo de 0,990 milímetros, inferior a un milímetro también, cómo muestra la Figura 95.

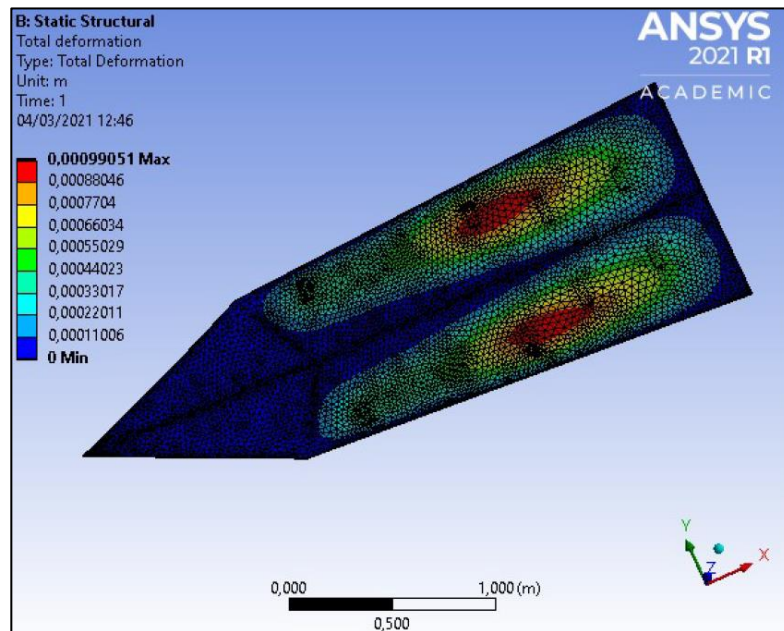


Figura 96. Deformación total del casco de 10mm (Fuente: elaboración propia).

8 Impacto ambiental

El dispositivo diseñado crea un impacto ambiental muy favorable.

El hecho de ser impulsado mediante energía eléctrica propicia la reducción de emisiones de gases y partículas contaminantes al entorno, como son los óxidos de azufre o los óxidos nitrosos. Esto beneficia a la fauna acuática, a la terrestre, a la vegetación y al mantenimiento de un ecosistema sano.

Estos gases, en particular el NO_2 y el SO_2 , emitidos por la combustión de combustibles fósiles, pueden producir desde enfermedades respiratorias hasta paros cardíacos o cáncer. En la vegetación pueden producir necrosis foliares y limitaciones en el crecimiento. En los ecosistemas pueden crear acidificaciones del océano, en las cuales varía el pH del agua y eutrofizaciones, que es un excesivo crecimiento de materia orgánica, creando catástrofes medioambientales.

Aunque hay estudios que señalan la cantidad de CO_2 que se genera en la fabricación y carga de las baterías de litio como algo interesante a comparar con la generación de CO_2 generado por los motores de combustión y la obtención de sus combustibles fósiles, esta ha sido reducida en los últimos años. [35]

Se suma que durante la navegación del dispositivo diseñado no se emite CO_2 al entorno. Esto es un factor muy positivo, dado que el CO_2 es el gas protagonista del efecto invernadero, por el cual existe un cambio climático que está produciendo grandes estragos para el medioambiente alrededor del mundo.

Una embarcación a motor de características similares, como puede ser una moto de agua, genera 2,38 kg de CO_2 por litro de gasolina consumido. [36]

Teniendo en cuenta que las motos de agua suelen tener un depósito de combustible de cerca de 70 litros, sustituyendo a una sola de estas motos de agua se ahorran 166,6 kg de emisiones de CO_2 más el ahorro de otras partículas y emisiones por depósito.

9 Presupuesto del proyecto

En este apartado se da un presupuesto aproximado del coste que tendrían los componentes y materiales necesarios para la construcción de un prototipo del dispositivo diseñado y el coste de ingeniería del proyecto.

9.1 Presupuesto del prototipo

Para poder acercarnos a la estimación de un presupuesto se considera que el casco estará hecho de un compuesto de fibra de carbono (PRFC) y la carrocería de termoplástico ABS Polystone.

Dado que los costes de fabricación de una embarcación dependen en gran medida del modelo de ésta, ha sido muy complicado determinar los costes de fabricación concretos que se requieren para realizar un prototipo de nuestro dispositivo. La falta de conocimientos del autor de este trabajo acerca del coste que podría tener un primer modelo del casco sobre el que moldear la fibra de carbono o el coste que supondría la realización de una matriz con la que elaborar una fabricación del casco de la embarcación, ha hecho que se decida estimar solamente el coste de los materiales necesarios.

El presupuesto que se presenta a continuación muestra los costes que supondrían la adquisición de los materiales y de los elementos comerciales que se presentan en el diseño final del dispositivo. Pero no tiene en cuenta los costes derivados de la fabricación y el montaje de este.

| Piezas | Material | Volumen pieza (m ³) | ρ material (kg/m ³) | Precio material (€/kg) | Coste material (€) |
|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------|
| Casco | Compuesto fibra carbono (PRFC) | 0,0736 | 1750 | 100 | 12880,00 |
| Cubierta | Termoplástico ABS (Polystone) | 0,0750 | 960 | 3,50 | 252,00 |
| Carenado columna de dirección | Termoplástico ABS (Polystone) | 0,0041 | 960 | 3,50 | 13,77 |
| Carenado manillar | Termoplástico ABS (Polystone) | 0,0004 | 960 | 3,50 | 1,34 |

| Elementos comerciales | Coste (€) |
|---|-------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - Motor Drive Master y controlador - Batería 96V-19,2kWh - Display E7 (incluye set de cableado) - Refrigeración circuito cerrado y vaso de expansión - Palanca aceleradora - Acoplador del eje de la hélice - Eje con su equipamiento - Manillar y columna de dirección con cables de dirección - Timón y componentes del timón | 11639,84 |
| Coste total | 24786,95 € |

Estos costes son muy altos sin incluir la totalidad de los componentes. Esto es debido a que se trata de una aproximación del coste de un primer prototipo del dispositivo.

9.2 Costes de ingeniería

A continuación, se presentan los costes de ingeniería por la realización de este proyecto.

| Tarea | Tiempo (h) | Precio/hora (€) | Total (€) |
|---|------------|-----------------|----------------|
| Estudio de la temática | 7 | 32 | 224,00 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Definiciones náuticas. • Estado de las embarcaciones eléctricas. | | | |
| Estudio de mercado | 18 | 20 | 360,00 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Tipos de embarcaciones convencionales. • Novedades en embarcaciones eléctricas e híbridas. | | | |
| Estudio de la tecnología | 78 | 35 | 2730,00 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Estudio de factores que afectan en el diseño de las motos de agua. • Entendimiento de su mecánica. • Estudio de la arquitectura de las motos de agua. | | | |

| | | | |
|---|-----|----|-------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Estudio de compañías de motores eléctricos marinos y sus ofertas de componentes. • Especificaciones del diseño. | | | |
| Diseño | 280 | 35 | 9800,00 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Propuestas de diseño del dispositivo con las compañías estudiadas. • Diseño CAD de los componentes comerciales de las compañías para satisfacer las propuestas de diseño. • Diseño CAD del casco y carrocería de las soluciones propuestas. • Cálculos y simulaciones sobre la solución final. | | | |
| Redacción de documentos | 100 | 15 | 1500,00 |
| <ul style="list-style-type: none"> • Memoria | | | |
| Factura final | | | 14614,00 € |

Conclusiones

A continuación, se presentan las cuatro conclusiones de este proyecto.

En primer lugar, se concluye el trabajo con un diseño de un dispositivo acuático semejante a una moto de agua, impulsado con energía eléctrica, realizando un dimensionamiento eléctrico y mecánico que facilita la tarea de realizar un proyecto de diseño en detalle más avanzado. Sus dimensiones y especificaciones finales se muestran en la siguiente tabla.

| Datos técnicos | Diseño Conceptual | |
|----------------------------------|-------------------|---------------|
| Eslora | m | 3.73 |
| Manga | m | 1.39 |
| Altura | m | 1.32 |
| Masa en vacío | kg | 493.9 |
| Carga máxima | kg | 132.3 |
| Potencia máxima | kW | 20 |
| Momento máximo | Nm | 64 |
| Velocidad crucero | km/h | 25 |
| Velocidad máxima (aprox.) | km/h | 30 |
| Autonomía | h | 1.5 |
| Batería | kWh | Li-FePO4/19.2 |
| Capacidad | Personas | 2 |

En segundo lugar, se ha realizado un ligero diseño en detalle para definir cómo actúan todos los elementos del dispositivo entre ellos, definiendo como se juntan la cubierta con el casco, la pieza para sujetar la batería y el motor o la unión de los elementos del sistema de dirección y del de impulsión entre sí y con el resto de la carrocería, que propician el desarrollo en detalle posterior.

En tercer lugar, se ha constatado la posible utilización de este dispositivo mediante cálculos de flotabilidad, de estabilidad, simulaciones de fluidos y simulaciones estructurales. Con los cálculos de flotabilidad se ha obtenido la línea de flotación y el peso muerto de la embarcación, con los cálculos de estabilidad, se ha obtenido la confirmación de su estabilidad en su escora máxima, con las simulaciones de fluidos se ha podido aproximar la velocidad crucero y máxima del dispositivo y con las simulaciones estructurales se ha comprobado que el casco puede soportar el peso del dispositivo fuera del agua.

Finalmente, se ha realizado una búsqueda de componentes de tres compañías de suministros de soluciones náuticas conocidas, escogiendo los elementos necesarios para un proyecto de estas características, descartando el uso de los demás tras bocetajes previos.

En lo personal se ha conseguido cumplir con el objetivo de realizar el diseño de un producto desde cero para conocer los pasos a seguir y la metodología a aplicar hasta obtener un primer diseño conceptual.

También se ha aprendido mucho sobre las características generales de las embarcaciones, especialmente de las motos acuáticas de gasolina, tras haber realizado un estudio en profundidad de ellas para poder realizar el diseño del dispositivo.

Para acabar, se han aprendido nuevas herramientas del software SolidWorks tras haber realizado todos los modelos CAD que se presentan en el proyecto y a utilizar el simulador Fluent de ANSYS.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer este trabajo a mi familia. A mis padres, Ana y Juan Antonio, por enseñarme y transmitirme sus valores y forma de entender la vida, por todos los conocimientos que he adquirido de ellos, por el soporte, otorgado siempre en cualquier momento que lo he necesitado y por la confianza absoluta que han depositado en mí y cualquiera de mis empresas. También a mi hermana, Carla, de quién admiro su autenticidad, su capacidad de trabajo y su fortaleza mental. En ti me he fijado para tomar decisiones, como sin ir más lejos, la de lanzarme a la realización de este proyecto.

En segundo lugar, a Emilio Angulo Navarro, mi tutor. Desde que empecé el grado en ingeniería industrial, he tenido el deseo de realizar un proyecto relacionado con el sector naval, el cual me fascina desde que lo conocí de pequeño. Por eso, cuando vi la propuesta colgada en la bolsa de proyectos me pareció un final perfecto a mi etapa de estudiante. Quiero darte las gracias, Emilio, por haber planteado este proyecto y por haberme aceptado como tutorado sin cuestionar antes mis aptitudes, así como la confianza y la libertad que me has otorgado durante la realización de este proyecto, guiándome y marcándome el camino a seguir siempre con honestidad.

En tercer lugar, quiero agradecer la realización de este proyecto a mis amigos, especialmente a los del máster y a todos los de Grassot, que me han hecho pasar grandes momentos y olvidarme de las preocupaciones cada vez que los veía. También por su apoyo, sus consejos y los ánimos que siempre me han dado.

También quiero agradecer la colaboración de Ricard Bosch, a quién consulté sobre temas de potencias y quién me ofreció su ayuda muy amablemente cuando se la pedí.

Finalmente, a todos los profesores y toda la gente que me he cruzado y que me han aportado lo necesario para llegar hasta donde estoy actualmente.

Bibliografia

Referencias bibliogràficas

- [1] G. García, “El sector marítimo no tendrá más remedio que electrificarse recurriendo a las baterías - Sector - Híbridos y Eléctricos | Coches eléctricos, híbridos enchufables,” 2020. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/sector-maritimo-electrificarse-baterias/20200327195758034156.html>.
- [2] S. Dasgupta, “A Guide to Different Types of Boats,” 2021. <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/a-guide-to-different-types-of-boats/>.
- [3] M. J. Lemos, “Barcos a motor: tipos, motores y usos - Cosas de Barcos,” 2020. <https://www.cosasdebarcos.com/blog/consejos/barcos-a-motor-tipos-motores-y-usos/#auxiliares> (accessed Mar. 10, 2021).
- [4] Q-Yacht, “Q-Yachts_Brochure,” 2020.
- [5] “SAY Carbon - Models - SAY 29 E.” <https://saycarbon.com/en/models/say-29-e/#specifications>.
- [6] “AQUANIMA 40 | Azura.” <https://www.azura-marine.com/aquanima-40> (accessed Apr. 08, 2021).
- [7] “X shore EElex8000 brochure.”
- [8] “Candela Speed Boat.” <https://candelaspeedboat.com/product/>.
- [9] Narke, “Narke Brochure,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2020.
- [10] K. Shaw, “Hull Design: What Makes a Ski Good in Rough Water?,” 2018. <https://watercraftjournal.com/understanding-what-makes-a-good-rough-water-hull-design/>.
- [11] L. Larsson, R. Eliasson, and M. Orych, “Principles of Yacht Design,” *Adlard Coles Nautical*, no. Second Edition. p. 352, 2000, [Online]. Available: <http://books.google.com/books?id=SCdRAGAAQBAJ&pgis=1>.
- [12] C. Woodford, “How do Jet Skis work? - Explain that Stuff,” 2020. <https://www.explainthatstuff.com/jetskiseadoo.html>.
- [13] C. Caswell, “Boat Hull Shapes, Designs and Options - boats.com,” 2020. <https://www.boats.com/boat-buyers-guide/boat-hull-shapes-designs-options/>.
- [14] Staff, “What are chines on a boat - What are the Differences,” 2020. <https://www.boatstickers.com.au/blog/what-are-chines-on-a-boat/>.
- [15] “Cómo Funciona Una Moto de Agua. | Funcionamiento del Jet-Ski.” <https://curiosidades.top/como-funciona-una-moto-de-agua/>.

- [16] “2002_Seadoo parts.”
- [17] Krautler, “Boat motor catalog,” 2018.
- [18] Torqueedo, “Movilidad eléctrica en el agua 2020,” 2020.
- [19] “Home - Bellmarine.” <https://www.bellmarine.tech/en/>.
- [20] Bellmarine, “Electric Propulsion Systems,” pp. 1–20, 2019, doi: 10.1201/9781420054002-6.
- [21] D. Savitsky, “ON THE SUBJECT OF HIGH-SPEED MONOHULLS,” vol. 18, pp. 19–28, 2003.
- [22] “DANIEL SAVITSKY Obituary - (2020) - River Vale, NJ - New York Times.” <https://www.legacy.com/obituaries/nytimes/obituary.aspx?n=daniel-savitsky&pid=195825488&fhid=17136>.
- [23] D. Savitsky, “SavitskyPlaningHulls1964 .pdf.” 1964.
- [24] PYlinc, “PSS-Shaft Seal Catalog,” 2020.
- [25] Scam marine, “Scam marine | Producción y comercialización de equipos náuticos.” <https://www.scam-marine.hr/view.asp?p=61&c=34>.
- [26] Torqueedo, “Cruise 10.0FP Saildrive Mount,” 2020.
- [27] Straumann implants, “Product Catalog_Europump,” *Measurement*, no. September, pp. 1–20, 2008.
- [28] Crew Riva, “Riva Racing Catalogue.”
- [29] IOTC, “Catalogo Italian Propellers,” p. 6, 2021.
- [30] M. A. . Prieto, Juan J.; Martin, “EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DEL TIMÓN DE CODASTE - PDF Free Download,” 2015, pp. 55–68, 2015, [Online]. Available: <https://docplayer.es/70161714-Evolucion-tecnologica-del-timon-de-codaste.html>.
- [31] “ACCIÓN DEL TIMÓN DE UN BARCO. EVOLUCIÓN Y GOBIERNO – buscopium.com.es.” <https://buscopium.com.es/accion-del-timon-de-un-barco-evolucion-y-gobierno/>.
- [32] Fao.org, “La hélice.” <http://www.fao.org/3/x0487s/X0487S00.htm#TOC>.
- [33] Fao.org, “Definiciones 2,” pp. 3–28, 2002.
- [34] A. Gudmundsson, “Prácticas de seguridad relativas a la estabilidad de buques pesqueros pequeños,” *Fao Doc. Técnico Pesca Y Acuic.*, no. M, p. 66, 2009, [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/i0625s/i0625s.pdf>.
- [35] D. Gutierrez, “3 motivos por los que las baterías de coches eléctricos son cada vez menos contaminantes - Tecnología - Híbridos y Eléctricos | Coches eléctricos, híbridos

enchufables.” <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/huella-co2-fabricacion-baterias-coches-electricos/20191219095357032196.html>.

[36] G. De Catalunya, C. Interdepartamental, and D. C. Climático, “Gases, Emisiones D E Invernadero, D E Efecto,” pp. 0–66, 2011.

Bibliografía complementaria

Anmarkrud, T. (2011). *Construcción de embarcaciones pesqueras: 4. Construcción de una embarcación sin cubierta de plástico reforzado con fibra de vidrio*. <http://www.fao.org/3/i1108s/i1108s.pdf>

BOE. (2018). Real Decreto 818/2018, de 6 de julio, sobre medidas para la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos. *Boletín Oficial Del Estado*, 61561–61567.

El dióxido de azufre SO2 | Instituto para la Salud Geoambiental. (n.d.). <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2>

Embarcaciones de recreo y trabajo | Röchling Group ES. (n.d.). <https://www.roechling.com/es/industrial/construccion-de-buques-y-embarcaciones/embarcaciones-de-recreo-y-trabajo>

Ensamble de Moto de Agua - YouTube. (n.d.). <https://www.youtube.com/watch?v=pktpaNoyLnY>

Eutrofización: definición y consecuencias | Fundación Aquae. (n.d.). https://www.fundacionaquae.org/eutrofizacion/?gclid=Cj0KCQjw0caCBhCIARIsAGAFuMzbfrg8YU4z3eFMRYn0MlzR4ARXbNOD7Y-I_UVd_u8wu9TG3yDAOIsaAvQFEALw_wcB

Haigh, R., Ianson, D., Holt, C. A., Neate, H. E., & Edwards, A. M. (2015). Effects of ocean acidification on temperate coastal marine ecosystems and fisheries in the northeast Pacific. In *PLoS ONE* (Vol. 10, Issue 2). Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117533>

Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W., & Dove, S. (2017). Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 4, Issue MAY). Frontiers Media S. A. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00158>

La acidificación de los océanos: un enorme reto para los ecosistemas | Euronews. (n.d.). <https://es.euronews.com/2020/02/19/la-acidificacion-de-los-oceanos-un-enorme-reto-para-los-ecosistemas>

Lam, W. C., Peeters, K., & Tichelen, P. Van. (2019). *Preparatory Study on Ecodesign and Energy Labelling of Batteries under FWC ENER/C3/2015-619-Lot 1 Task 5 Environment & economics - For Ecodesign and Energy Labelling*. April, 1–85. https://ecodesignbatteries.eu/sites/ecodesignbatteries.eu/files/attachments/ED_Battery_study_Task5_v3_20190823.pdf

Los plásticos marcan nuevas pautas en la ingeniería naval moderna. (n.d.). <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/31376-Los-plasticos-marcan-nuevas-pautas-en-la-ingenieria-naval-moderna.html>

Materiales del casco. (n.d.). <http://www.barcelonaworldrace.org/es/educacion/programa->

educativo/explora/navegacion/el-imoca-60/construccion-de-un-imoca-60/materiales-del-casco

Materiales y cascos oceanicos. (n.d.).
http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Diseno_Construccion/Mat_Cascos_Oceanicos/Mat_Cascos_Oceanicos.htm

Motos náuticas | Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (n.d.).
<https://www.mitma.gob.es/marina-mercante/nautica-de-recreo/normas-de-seguridad-y-recomendaciones/motos-nauticas/normas-de-seguridad-para-motos-nauticas>

Óxidos de Nitrógeno. (n.d.). <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>

Rojas BAsalto, M., & Salzmann Mai, F. (1981). Proceso constructivo de una embarcación a vela. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699).

Sea Doo Spark Trixx 2020 - Review en Español - YouTube. (n.d.).
<https://www.youtube.com/watch?v=Sx6U26ybJcQ>

Technology - WaveRunner(PWC, MarineJet) | Yamaha Motor Co., Ltd. (n.d.). <https://global.yamaha-motor.com/business/waverunner/technology/>

UPCommons. (n.d.). <https://upcommons.upc.edu/>