

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño de un sistema de baliza automática para puertos deportivos

MEMORIA

Autores: Alejandro Álvaro Benítez y Marc Riera Carreras
Director: Emilio Angulo Navarro
Convocatoria: Septiembre 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Este proyecto se centra en el diseño conceptual de una baliza automática para uso en puertos deportivos. A partir del estado del arte se ha constatado que el mercado actual es inexistente, así pues, partiendo de cero, se han creado dos posibles conceptos. Estos conceptos incluyen un diseño del sistema mecánico, electrónico y de telecomunicaciones.

Dicha embarcación de servicios tendrá la función de baliza, la cual estará dentro de puerto y se encargará de ir a buscar embarcaciones y guiarlas hasta su amarre. Todo esto de forma automática.

Con tal de realizar un diseño conceptual, primero se estudiará las opciones que presenta el mercado, para posteriormente presentar dos alternativas que puedan cumplir las funciones deseadas. Con la ayuda del programa de diseño asistido *Solidworks 2018* se presentan las soluciones conceptuales de ambas propuestas.

Para el análisis de la embarcación, a partir del planteamiento de las ecuaciones matemáticas y físicas se realiza una simulación de su funcionamiento. Esta simulación va acompañada de una hoja de cálculo que simula el controlador PID incorporado. Todo esto con el fin de tomar la decisión de cuál de las dos propuestas es la más adecuada para este proyecto y su fin.

Índice

Resumen.....	2
Índice.....	3
1. Introducción.....	5
1.1. Objetivo	5
1.2. Alcance del proyecto	5
1.3. Justificación personal e industrial.....	6
2. Estado del arte	8
2.1. Estudio de precedentes.....	8
3. Especificación básica	12
4. Diseño conceptual y preselección de componentes	15
4.1. Alternativa 1	18
4.2. Alternativa 2	55
4.3. Diseño detallado del conexionado.....	65
5. Simulación de funcionamiento y diseño del PID	74
5.1. Simulación Alternativa 1	74
5.2. Simulación Alternativa 2	80
6. Comparativa entre alternativas y decisión.....	84
7. Planificación.....	86
8. Estudio económico	88
9. Impacto medioambiental	90
10. Conclusiones	92
11. Sigüientes pasos y futuras mejoras	95
12. Agradecimientos	97
13. Bibliografía.....	98

1. Introducción

En este primer apartado se va a describir el objeto del proyecto y el alcance de éste. También se incluye una justificación industrial del proyecto y la motivación personal que ha hecho emprender este proyecto. Debido a la larga extensión que conlleva el diseño entero de una embarcación, se dividirá el proyecto en dos partes. La primera parte consistirá en el estudio y diseño del apartado mecánico y diseño 3D. Mientras que la segunda parte estará formada por el estudio, selección y diseño de componentes electrónicos que permitan controlar el vehículo.

1.1. Objetivo

Este proyecto tiene como objetivo el diseño de una pequeña baliza autónoma, que pueda funcionar como embarcación de servicio en un puerto. Se pretende optimizar el proceso de entrada de las embarcaciones de recreo mediante el acompañamiento de la baliza autónoma, desde la entrada del puerto hasta el amarre que se le asigna desde capitanía. Se requiere entender cuáles son todos los elementos necesarios para el diseño conceptual de una embarcación, para posteriormente presentar una solución. Para conseguirlo se deberán fijar desde un inicio el alcance de dicha embarcación para estudiar cual es la mejor solución tecnológica que se puede ofrecer al mercado. Además, esta solución tecnológica se acompañará de una simulación matemática para estudiar su comportamiento.

1.2. Alcance del proyecto

Debido a la magnitud que conllevaría el diseño completo de un producto de este grado de complicidad, este proyecto se va a centrar en mayor medida en los siguientes conceptos:

- Diseño conceptual de un primer prototipo.
- Estado del arte, estudio de tecnologías actuales en automatización marina.
- Diseño conceptual del sistema mecánico, electrónico y de telecomunicaciones. Todos los sistemas se han representado en el diseño 3D con todas sus respectivas componentes.
- El sistema mecánico consta de sistema de propulsión y dirección.

- El sistema electrónico contiene componentes específicos capaces de controlar todo el vehículo. Se ha llegado al detalle en las diferentes conexiones a realizar.
- El sistema de telecomunicaciones logra conectar el barco (sistema móvil) con el sistema central situado en el puerto.
- Se ha realizado una simulación de trayectorias con controlador PID mediante una hoja de cálculo (diseño de un *servo*) por diferencias finitas.
- Presupuesto del proyecto.
- Impacto medio ambiental.

Por otra parte, es importante conocer aquellos conceptos que no se han desarrollado en este proyecto:

- No se ha diseñado detalladamente el primer prototipo que se debería desarrollar. Solamente se ha realizado selección y posicionamiento de componentes.
- Con lo especificado en el punto anterior, no se ha realizado ninguna prueba de que realmente todos los componentes seleccionados cumplan correctamente su función.
- El diseño del casco del vehículo no se podría construir con el nivel de detalle en el que se encuentra. Se ha trabajado inicialmente con superficies y posteriormente se ha introducido un grosor.

1.3. Justificación personal e industrial

La motivación que ha hecho emprender este proyecto reside en entender mejor como estas nuevas tecnologías se pueden adaptar e implementar en el sector náutico, en el cual se van incorporando poco a poco como se hace en el sector terrestre. Es por eso que se decide conocer cómo se pueden incorporar estas tecnologías al sector. También es razonable creer que la implementación (de forma avanzada) de tecnología autónoma tiene una salida como negocio importante. Se trataría de un impacto en el mercado notable que supondría una revolución en el sector.

Además, al no estar desarrollado el concepto del proyecto en particular, da lugar a poder añadir más innovación para intentar diseñar una embarcación a nuestro antojo e intentando resolver todos los problemas ingenieriles que vayan surgiendo. Este es un reto que nos motiva y como futuros ingenieros queremos enfrentarnos al reto de emprender un proyecto sin demasiadas referencias a las que seguir.

En el ámbito industrial, se considera que este proyecto puede ser innovador y ser una base para futuros proyectos industriales en otros aspectos de la náutica. Es decir, sentar una base en relación a la función de balizado, para posteriormente poder hacer otras acciones con una baliza similar, como podría ser tomar muestras de agua, grabar fondos marinos, etc.

2. Estado del arte

Como se ha comentado anteriormente, el sector náutico está empezando a desarrollar grandes proyectos en cuanto a automatización, aunque aún no salgan grandes innovaciones al mercado. Por este motivo, las referencias existentes en cuánto a embarcaciones o balizas de tamaño reducido, autónomas y sostenibles, son casi inexistentes.

Actualmente, el proceso que se pretende optimizar funciona de la siguiente forma:

- Llega una embarcación de recreo al puerto deportivo y debe comunicarse por radio (es necesario obtener el canal de radiocomunicación marina (VHF) del puerto) si no se tiene un amarre ya establecido.
- Mediante la comunicación por radio se notifica la llega y se asigna un amarre y es la embarcación la encargada de encontrar dicho amarre por su cuenta.
- El paso anterior puede parecer sencillo siempre y cuando el puerto no sea de grandes dimensiones, en caso contrario, puede tratarse de un sistema lento y poco eficiente.
- La embarcación entrante busca el amarre y procede a amarrar.

Con el proceso citado, nuestro proyecto pretende optimizarlo mediante la tarea de la baliza. Que se encarga de dirigir y acompañar la embarcación entrante hasta el amarre sin riesgo a pérdida. Si se diera el caso de que en el algún puerto se realice esta función, pero con una baliza tripulada, se optimizaría el hecho de no requerir de uno o varios tripulantes.

2.1. Estudio de precedentes

Varias instituciones del mundo investigan sobre los buques autónomos sin tripulación. Estos proyectos se llevan a cabo frecuentemente en asociación con universidades con el fin de investigar y desarrollar estos prototipos. Paralelamente, empresas destacadas en el sector también lideran este ámbito de sistemas náuticos para un uso mercante. Con relación a los servicios proporcionados por los puertos deportivos, son básicos y sin ninguna tecnología novedosa aplicada.

Además, si nos fijamos en la normativa española, no existe ninguna referencia respecto a vehículos no tripulados.

Como se ha repetido en varias ocasiones, las referencias en este sector son bastante escasas. Aun así, existen algunos prototipos que empiezan a asomarse a estas nuevas tecnologías, aunque con usos y objetivos muy distintos.

A nivel universitario, existen proyectos puntuales en cuanto a embarcaciones no tripuladas, sobre todo en Estados Unidos:

- En California se enviaron al océano Pacífico unas barcas autónomas en forma de tabla de surf durante 8 meses para estudiar su comportamiento, que inclemencias meteorológicas había, etc.

A nivel más empresarial, los proyectos que hoy en día más están intentando indagar en este sector son:

- **Delft University of Technology (Holanda)**: se está investigando con buques de mercancías no tripulados.

Este proyecto comandado por el profesor Rudy Negenborn, asegura que en 2030 el capitán de una embarcación estará en tierra controlando varias embarcaciones en vez de estar dentro de una pilotándola. Además, los capitanes estarán menos implicados en la logística de la embarcación, ya que ellas mismas se sincronizarán con los muelles de descarga para, de forma autónoma, hacer la descarga o la carga de toda la mercancía. De esta manera el capitán solo tomará el control del barco en caso de emergencia.

Según Rudy Negenborn, esto permitirá reducir en un 40% los costes del transporte marítimo, por lo que los envíos podrán empezar a hacerse más por mar con métodos sostenibles que por carretera.

Además, el desafío consiste en rediseñar completamente el concepto de *embarcación*, ya que tal y como las entendemos hoy, están concebidas para llevar tripulación a bordo.



Imagen 2.1.1: Prototipo de la Delft Technology University

- **Re Volt (Noruega):** esta empresa noruega está diseñando barcos de cabotaje y transbordadores autónomos para cruzar ríos.

El ReVolt es un prototipo conceptual de embarcación de 60 m, totalmente autónomo y eléctrico que no requiere tripulación. Este prototipo es capaz de viajar a 6 nudos durante 100 millas náuticas (185,2 km) y con una capacidad de 100 contenedores de carga. Actualmente este proyecto está en la fase de prototipaje.



Imagen 2.1.2: Diseño conceptual del ReVolt

- **Robert Allan:** esta famosa empresa especializada en remolcadores ha lanzado su primera serie de remolcadores autónomos.

Aunque la empresa los haya anunciado como autónomos, estos remolcadores (en la imagen con funciones de apagafuegos) están diseñados para ser dirigidos desde otra embarcación o desde tierra. Equipados con sensores y cámaras térmicas, el hecho de que sean embarcaciones no tripuladas permite que en situaciones de máximo peligro no se exponga al ser humano.



Imagen 2.1.3: Remolcador semi – autónomo Robert Allan

3. Especificación básica

En primer lugar, se describe qué función debe desarrollar la baliza para posteriormente conocer en detalle diferentes especificaciones que deberá cumplir. La función principal del vehículo que debe cumplir es realizar desplazamientos marítimos dentro de un puerto, debe considerarse que no se trata de mar abierto y que la maniobrabilidad deberá ser elevada.

Dichos desplazamientos serán los de ir a buscar una embarcación a la entrada de puerto y conducirla hasta su pantalán. La baliza recibirá el amarre al que debe dirigirse desde una estación central, que se encontrará en la capitanía del puerto.

A continuación, se van a definir las especificaciones básicas para el casco de la embarcación, para su señalización, para su parte propulsora y energética, para la parte de comunicaciones y finalmente para su sistema de localización.

Casco de la embarcación

Las especificaciones del casco de la embarcación quedan definidas por su eslora¹ y manga², por los movimientos que debe poder desarrollar y su estabilidad. Estas quedan definidas a continuación:

- Eslora: entre 1 y 1,5 metros.
- Manga: entre 0,5 y 0,75 metros.
- Consideramos que las medidas establecidas previamente son coherentes para la embarcación ya que permiten almacenar un buen número de componentes y además se mantiene un tamaño reducido para mejorar la maniobrabilidad.
- Movimientos a poder desarrollar:
 - Velocidad máxima de entre 4 y 5 nudos³ (aproximadamente 2,5 m/s). Esta velocidad viene establecida por ley en los puertos y es más que suficiente para cubrir la distancia que separa los amarres con la entrada del puerto.
 - Radio de giro pequeño para aumentar la maniobrabilidad.
 - Capacidad de marcha atrás.

¹ Eslora: longitud de una embarcación medida de popa a proa (longitudinal).

² Manga: longitud de una embarcación medida de estribor a babor (transversal)

³ Velocidad máxima en puerto.

- Capacidad de frenado en caso de emergencia (detección mediante sensores).
- El barco debe ser lo más estable posible. Debido a que las aguas en puertos son aguas tranquilas, se intentará aumentar la estabilidad mediante la disminución de los balanceos. Por lo tanto, se intentará situar los elementos de forma adecuada para lograr un centro de gravedad bajo y también centrar el centro de gravedad respecto el centro de presiones de flotación.

Propulsión y energía

En este apartado, se van a definir tanto las especificaciones relacionadas con la propulsión, como el tipo de fuente energética que se va a usar o la autonomía de la cual debe disponer la embarcación para operar de forma normal en un puerto de recreo.

- Fuente de energía eléctrica. Se ha optado por este tipo de energía debido a que actualmente ya existen soluciones para integrar la energía eléctrica sin sufrir un impacto en cuanto a prestaciones o autonomía. Además de esta manera se consigue una embarcación sostenible con el medio ambiente, que no contamina las aguas del puerto (ya de por si con residuos de gasolina y aceites) y reduciendo la huella ecológica.
- Autonomía de entre 2 y 3 horas. Esta autonomía sería la deseada a nivel teórico en cuanto a las horas de trabajo continuas que podría desarrollar la embarcación autónoma. En la realidad, esta autonomía se verá mermada por las maniobras de regreso al punto de reposo, el mantenimiento de los sistemas de comunicación e iluminación, etc.
- El control se hará mediante un controlador digital.
- La recarga se hará mediante enchufado a corriente de tipo doméstica.

Señalización

Debido a la función de esta embarcación, debe disponer de un sistema de iluminación potente para ser visible en condiciones de baja visibilidad o nocturnas. Por lo tanto, la especificación lumínica es:

- Visible a una distancia máxima de entre 75 y 100 metros en condiciones de buena visibilidad tanto diurna como nocturna.

- Visible a una distancia de entre 25 y 50 metros en condiciones de mala visibilidad, como lluvia o niebla.

Comunicación

Al tratarse de una embarcación autónoma, el sistema de comunicación con la base (capitanía en nuestro caso) debe cumplir:

- Sistema de transmisión de datos capaz de trabajar a un mínimo de 2 Km de distancia.
- Ancho de banda mínimo de 3 kB/s que permita la constante comunicación entre la baliza y el sistema central.

Localización

Debido a la función de esta embarcación, el sistema de localización debe ser preciso y exacto, alrededor de unos 3 metros de precisión.

- Sensor de posicionamiento (DGPS/GPS) a nivel métrico para realizar correctamente las trayectorias.
- Trayectorias: capaz de leer unas coordenadas y procesar dicha información para transmitirla en forma de potencia a los motores.

Con todas estas especificaciones, a continuación, se procede al diseño conceptual para el diseño de la baliza autónoma.

4. Diseño conceptual y preselección de componentes

Para definir el diseño conceptual y que componentes van a formarlos, hay que entender bien cuál va a ser la función de la baliza dentro de un puerto deportivo.

La baliza partirá de un punto origen en reposo, donde también se albergará su punto de recarga. Cuando una embarcación desee entrar a puerto, ésta se comunicará por radio con la capitanía del puerto para que le asigne, en caso de disponibilidad, un amarre donde atracar el barco. Una vez confirmada por parte de capitanía la plaza disponible, se le enviará la información (que consiste en las trayectorias de ida y de vuelta) a la baliza y ésta saldrá del punto de origen hasta la entrada del puerto. Una vez allí, hará una señal lumínica (en forma de *flashes*) a la embarcación que desea entrar a puerto y la guiará hasta su plaza en el pantalán. Una vez allí la baliza volverá al punto de origen a la espera de una nueva orden.

Teniendo en cuenta las funciones que desarrollará la baliza, habrá que definir:

- Sistema mecánico: encargado de mover la baliza por todo el puerto deportivo.
- Sistema de comunicaciones: encargado de comunicarse con la estación central en capitanía del puerto.
- Sistema de localización y señalización: encargado del posicionamiento y la iluminación de la baliza.
- Sistema de control: encargado de controlar las funciones de la baliza, principalmente el control de la trayectoria a través del sistema mecánico; mediante la información recibida por sensores, localizador GPS, etc.

Entrando más en detalle, el sistema mecánico estará formado por el motor eléctrico (encargado de la propulsión) y el sistema de dirección, encargado de mover el eje del motor para dirigir la baliza alrededor del puerto. La energía será proporcionada por una batería, comandada por un *BMS*⁴.

El sistema de comunicaciones estará formado por dos antenas que permitirán la comunicación constante entre baliza y sistema central.

⁴ Battery Management System

El sistema de localización estará formado por un sistema GPS mejorado. Consistirá en corregir el posible error proporcionado por el GPS mediante el conocimiento previo de localizaciones exactas dentro del puerto. Tendremos las coordenadas reales de estas localizaciones y a partir de ahí se realiza la corrección.

El sistema de control estará formado por una placa de desarrollo base que se encargará de procesar toda la información recibida para dar órdenes al controlador del motor y al motor paso a paso integrado que permitirá realizar giros.

Un esquema básico de los sistemas que forman la baliza queda presentado en la siguiente imagen. Se aprecia el sistema central, los GPS correctores que van distribuidos por el puerto y todos los sistemas que forman de la embarcación.

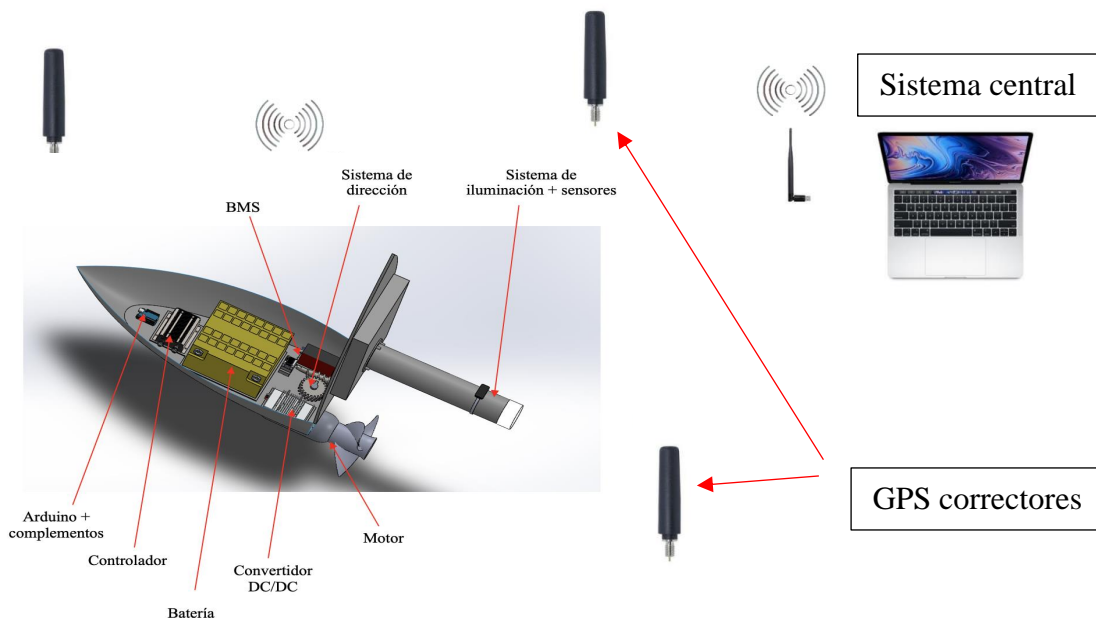


Imagen 4.1: Esquema de los sistemas que formarán la baliza.

Como se ha expuesto al inicio de este proyecto, al no haber precedentes en cuanto a este tipo de embarcación se refiere, se parte de cero. Para tener en cuenta diversas alternativas y tipos de diseño, se han pensado dos balizas con formas diferentes. Estos dos diseños se valorarán y compararán para luego decidir cuál es mejor opción.

Los dos conceptos que se van a diseñar conceptualmente son:

- Alternativa 1: se va a diseñar la baliza con la forma “típica” de un barco, proa puntiaguda seguida de una forma arqueada hasta una popa plana.

- Alternativa 2: se diseñará una baliza con forma circular y el motor situado en posición central. Se ha escogido esta forma por su simetría, lo que implicará mayor facilidad en los cálculos del control de maniobras.

Una vez entendidos cuales son los sistemas y elementos que formarán la baliza, se procede a presentar el diseño conceptual con los elementos que se han preseleccionado. El proceso seguido para definir las dimensiones de ambas alternativas ha sido el siguiente:

1. Dimensionado geométrico del casco de la embarcación: debe cumplir las especificaciones de estabilidad y ser lo suficientemente grande como para albergar todos los elementos de la embarcación.
2. Cálculo de las fuerzas de fricción generadas por el agua.
3. Cálculo de la potencia necesaria, mediante la velocidad máxima especificada.
4. Dimensionado del motor.
5. Dimensionado de las baterías, mediante la autonomía deseada, los servicios necesarios para satisfacer los otros elementos de la embarcación (localización, etc.) y (sobre todo) la disponibilidad del mercado.

Siguiendo este proceso, se pueden determinar los elementos esenciales que formarán la baliza.

4.1. Alternativa 1

El diseño conceptual de la primera alternativa se muestra a continuación, para luego presentar como se ha llegado a ella.

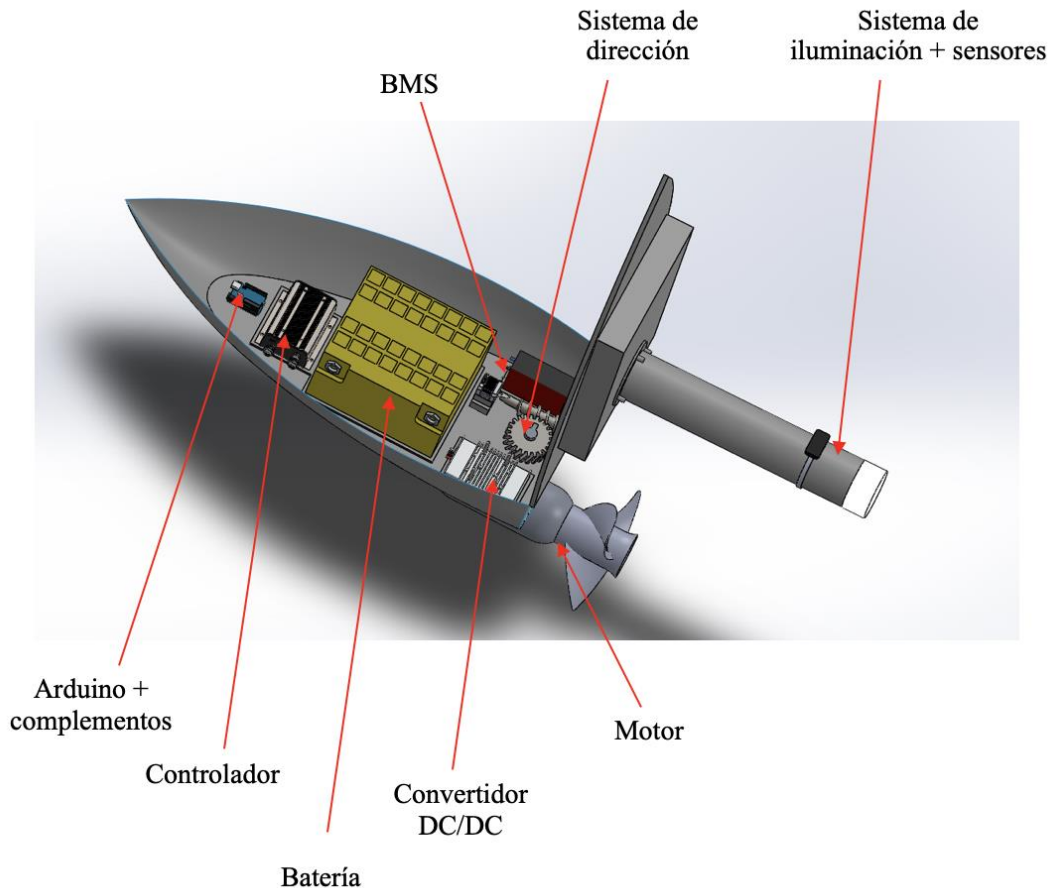


Imagen 4.1.1: Esquema de la alternativa 1 con sus componentes.

A continuación, se muestra el proceso seguido para llegar a definir el concepto de la primera alternativa; siguiendo los pasos expuestos en el punto 4.

– Dimensionado geométrico:

Se parte de un primer casco de eslora 1m (la más pequeña de las especificaciones) y manga 0,4 metros. Además, mediante la ayuda del programa asistido para dibujo en 3D Solid Works 2018, obtenemos el área proyectada frontal para el cálculo de las fricciones, que es de 70.342,92 mm².

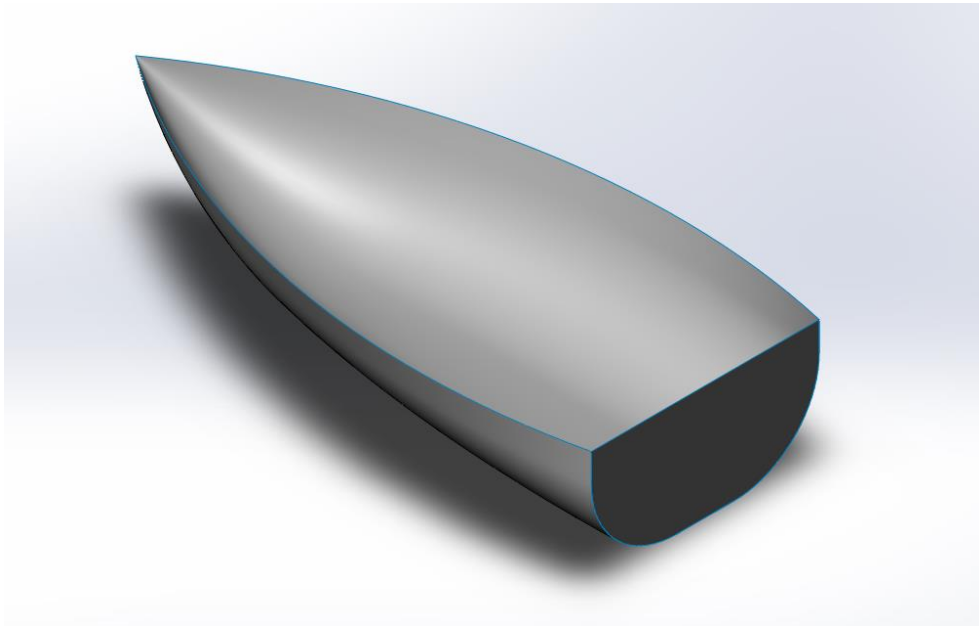


Imagen 4.1.2: Dimensionado geométrico de la Alternativa 1.

– Cálculo de las fuerzas de fricción:

Para el cálculo de las fuerzas de fricción, se necesita saber el área sumergida en el agua. Como aún no se dispone de todos los elementos que formarán la embarcación, ni por tanto su masa, se hace una primera hipótesis (a corroborar a posteriori). La hipótesis que se valorará es que el 20% del área está sumergida.

Sabemos que:

$$F_{fricción} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot c_x \cdot v^2$$

Teniendo en cuenta que:

- $S = 0,07 \text{ m}^2 * 30\%$
- $\rho = 1.027 \text{ Kg/m}^3$
- $c_x = 1,28$ (teórico, para proyección de cuerpos tridimensionales)

Podemos obtener la siguiente gráfica:

Cálculo de las fuerzas de fricción

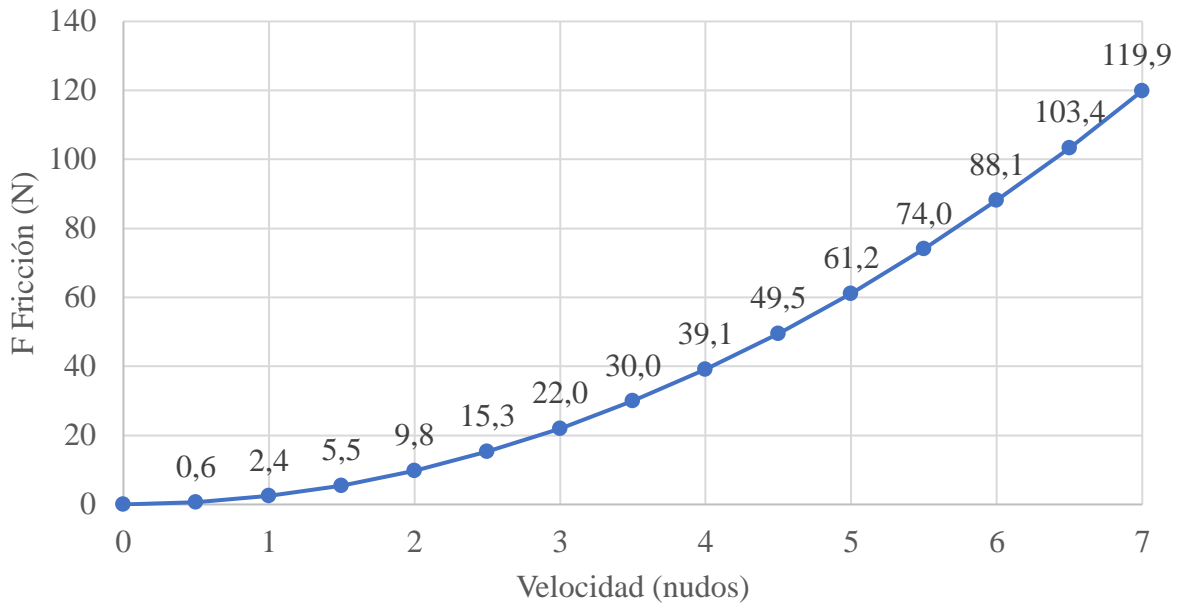


Gráfico 4.1.1: Cálculo de las fuerzas de fricción.

Como se había determinado en las especificaciones técnicas, la velocidad máxima deseada es de 5 nudos. Aun así, se decide imponer un margen de seguridad de 2 nudos teniendo en cuenta todos los elementos que formarán la baliza. La fuerza de fricción a 7 nudos es de 119,9 N.

– Cálculo de la potencia necesaria y dimensionado del motor:

Una vez obtenida la fuerza de fricción generada por este casco a velocidad máxima, calculamos la potencia necesaria como el producto de fuerza por velocidad. La potencia necesaria pues es de 431,72 W. Además, si se tienen en cuenta los rendimientos del motor, transmisión, batería y hélice⁵, se debería necesitar una potencia mayor de 800 W (coeficiente de seguridad ≈ 2)

– Dimensionado de las baterías:

Teniendo en cuenta la potencia calculada y la autonomía deseada según especificaciones (2-3 horas), se pueden dimensionar las baterías obteniendo su energía con el producto de

⁵ Los coeficientes de rendimiento de las hélices rondan el 50 % - 70%.

potencia por autonomía deseada. Así pues, la energía objetivo o deseada debe oscilar entre 0,863 kWh y 1,295 kWh.

Una vez obtenido el dimensionado geométrico, de potencia y de energía, se deciden específicamente cuales van a ser los componentes que formarán cada uno de los sistemas.

– Elección del motor:

De cara a elegir el motor, la primera cosa que se ha constatado es que, a nivel industrial y de producción en serie (sin tener en cuenta que se podrían obtener todos los elementos hechos a medida), la potencia mínima ronda aproximadamente 1kW (con potencias útiles que rondan los 0,8kW).

De entre todos los motores existentes en el mercado, se ha optado por el motor de menor potencia que ofrece la marca de motores eléctricos para embarcaciones Piktronik. Este ha sido escogido por ser el motor de menor potencia que se ofrece en el mercado y por la fiabilidad que caracteriza a la marca que lo fabrica.

Este motor, de tipo *brushless*, tiene las siguientes especificaciones:

- Potencia = 1 KW
- Potencia de salida = 800 W a 16 V y 50 A
- Velocidad de giro = 1.100 rpm
- Par = 7 Nm
- Masa = 18 Kg

Así pues, este motor cumple perfectamente con las especificaciones deseadas y con el dimensionado anteriormente calculado.



Imagen 4.1.3: Motor Piktronik.

A través de las medidas que proporcionaba el fabricante, se ha hecho una aproximación de éste.

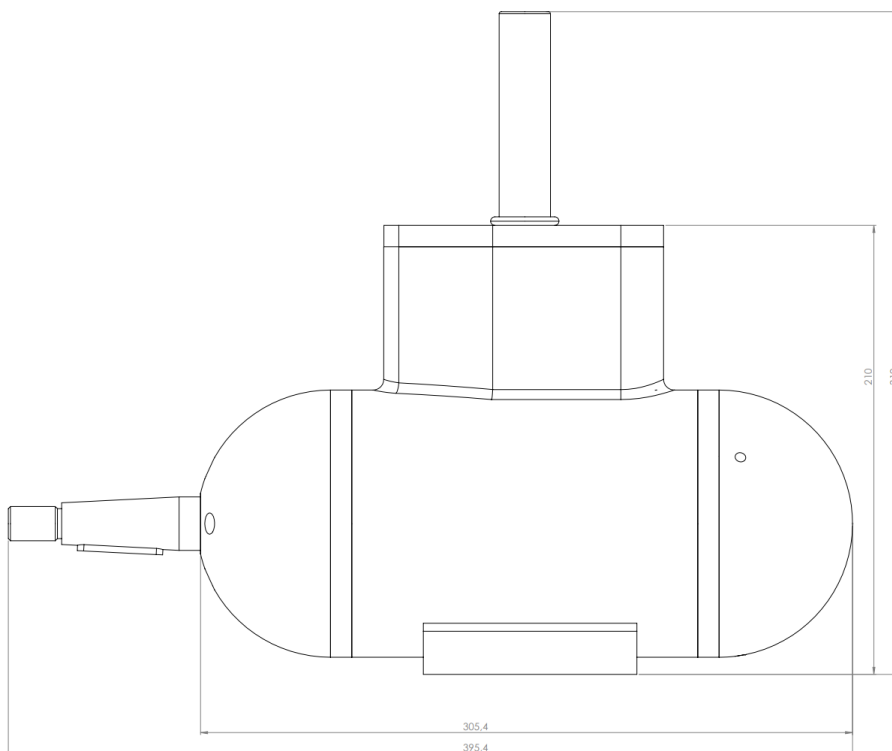


Imagen 4.1.4: Medidas proporcionadas por el fabricante.

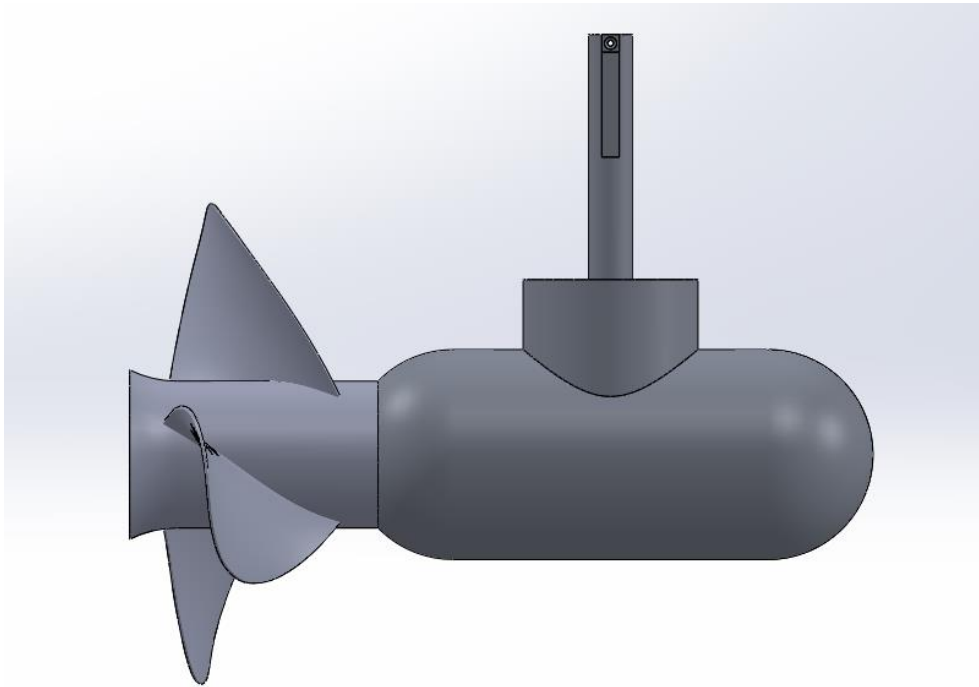


Imagen 4.1.5: Aproximación del motor mediante Solid Works a partir de las medidas proporcionadas por el fabricante.

– Elección de la batería:

A la hora de elegir la batería, es preferible seleccionar una que tenga el mismo voltaje que el motor, es decir, una que trabaje a 16 V, pues no se quiere usar un convertidor adicional (ya se va a necesitar uno para los elementos de control, señalización, etc.) para ahorrar tanto espacio como peso.

Para ello, se recurre a la marca *Winston Battery*. De entre muchas opciones en el mercado, esta marca se caracteriza por poner en el mercado mucha variedad de opciones a una relación calidad – precio muy elevada.

La batería escogida es la WB a 90Ah, con cargador de la marca GWL/Power. La primera cosa que cabe remarcar es que con esta elección se sacrifican 0,2h (12 minutos) respecto a las especificaciones deseadas, ya que la autonomía teórica es de 1,8h (90Ah / 50A del motor). Se decide sacrificar esta falta de autonomía en pro de no aumentar el tamaño y peso con la adición de una segunda batería, lo que haría aumentar también el tamaño de la baliza.

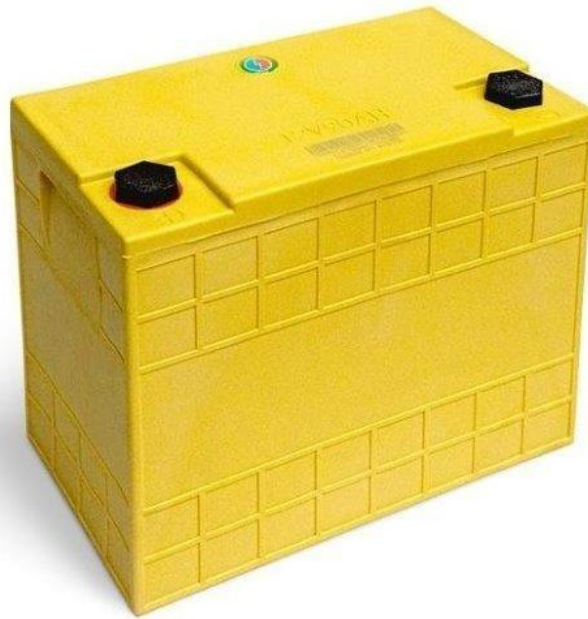


Imagen 4.1.6: Batería Winston Battery de 90 Ah.



Imagen 4.1.7: Cargador GWL/Power.

La marca Winston solo proporciona las dimensiones máximas exteriores de la batería, por lo que de nuevo lo que se ha realizado es una aproximación.

Medidas proporcionadas por el fabricante: 282 x 155 x 248 mm.

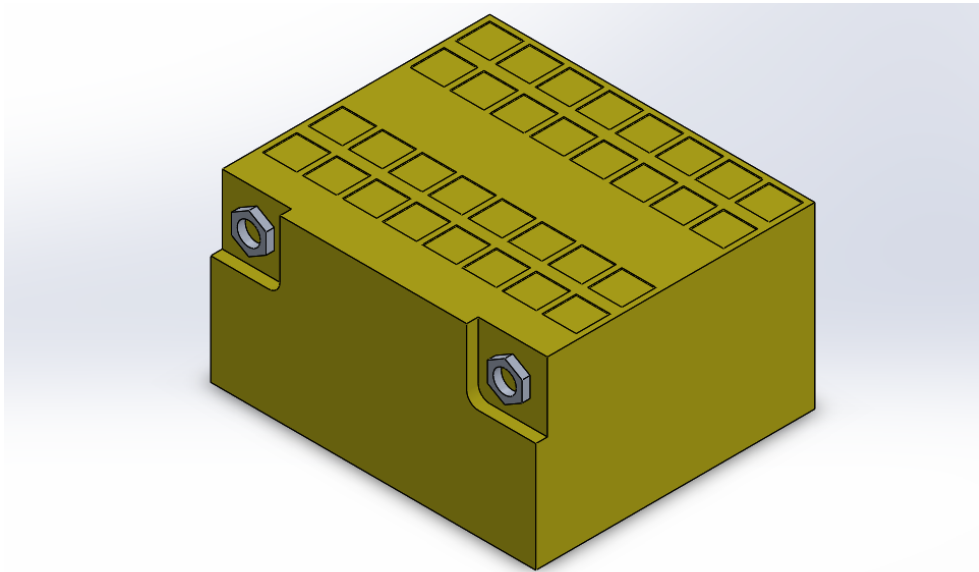


Imagen 4.1.8: Aproximación de la batería a partir de las medidas proporcionadas por el fabricante.

Para comandar la batería se ha seleccionado un *BMS* que pueda trabajar al voltaje descrito en la batería. El producto seleccionado es de la marca RoboteQ, modelo BMS1040. Este BMS ofrece muchas ventajas: control de intensidad, control de temperatura, control de carga, opción de conexión Bluetooth para disponer de información en tiempo real, trabajo entre 10 y 40 V, etc.

El esquema proporcionado por el fabricante es el siguiente:

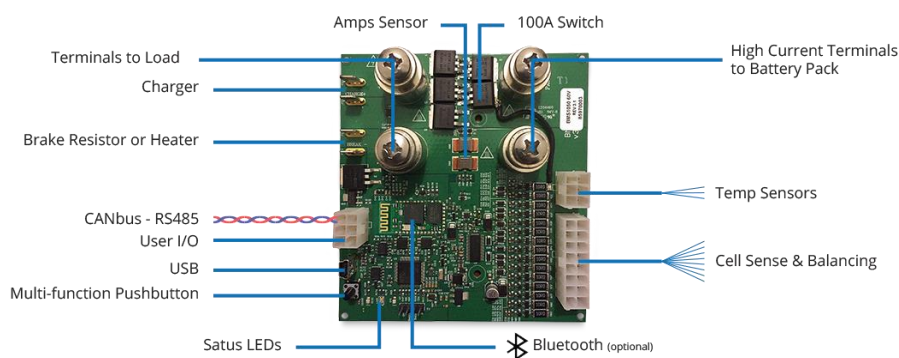


Imagen 4.1.9: Esquema del BMS.

Medidas proporcionadas por el fabricante: 133 x 86 x 48 mm.

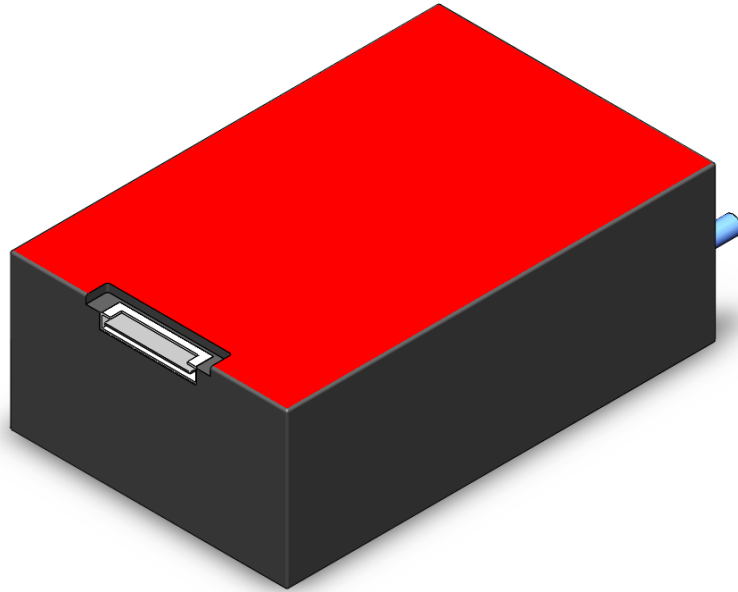


Imagen 4.1.10: Aproximación del BMS a partir de las medidas ofrecidas por el fabricante.

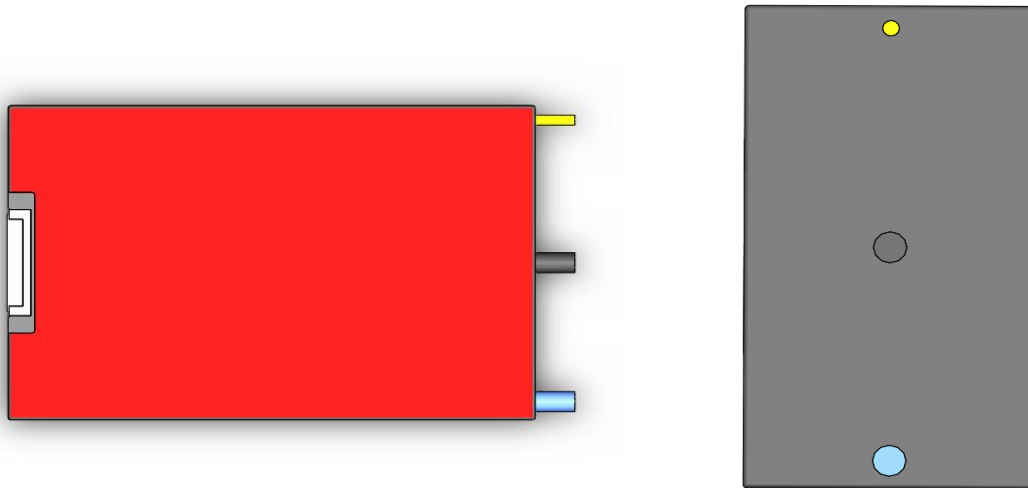


Imagen 4.1.11: Vistas superior y lateral del BMS.

– Diseño del sistema de dirección:

Como último elemento del sistema mecánico, falta definir el sistema de dirección, encargado de generar un par al eje vertical del motor y así poder generar un cambio de trayectoria en la baliza.

El sistema de dirección estará formado por un motor paso a paso unido a un sinfín que, mediante un engranaje, transmitirá el par de giro al eje del motor.

Además, se ha diseñado un sistema que los fije en el suelo de la baliza.

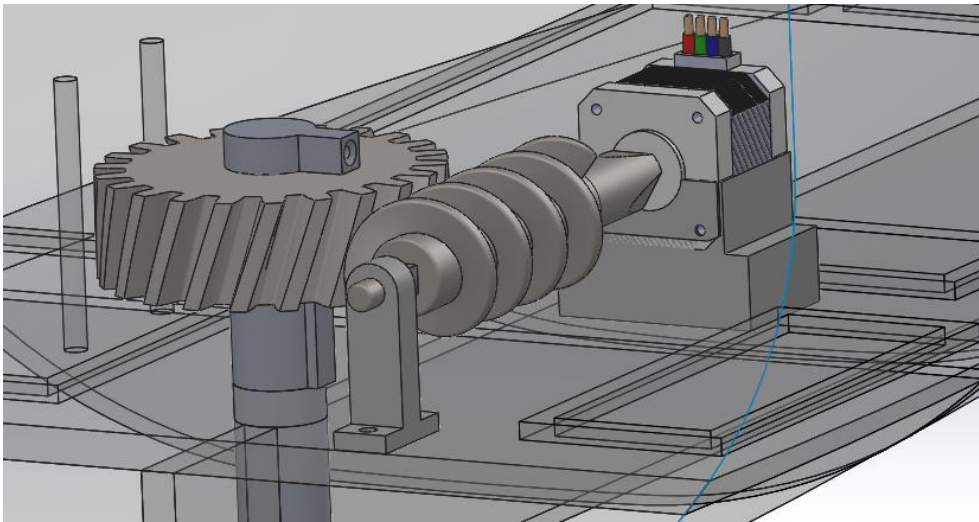


Imagen 4.1.12: Sistema completo de dirección.

El diseño del sistema completo se describe a continuación.

El motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que, dado un impulso eléctrico, es capaz de convertirlo en un giro angular determinado o paso. Estos impulsos eléctricos pueden provenir de una fuente digital, por lo que lo hace la mejor opción para trabajar con el Arduino.

Escoger el motor paso a paso, no se podría hacer sin antes saber cuáles van a ser las fuerzas de fricción generadas por el roce entre el eje del motor y el casco (teniendo en cuenta que serán altas, pues es un sistema que no deja pasar el agua). Como se debería hacer experimentalmente y queda fuera del alcance de este proyecto, se escogerá uno en

genérico de la empresa Trinamic Motion Control que trabaje a 5 V, como podría ser el QSH4218-41-10. Estos motores trabajan con 200 pasos por vuelta (incremento de 1,8 grados) y con una precisión del 5%.

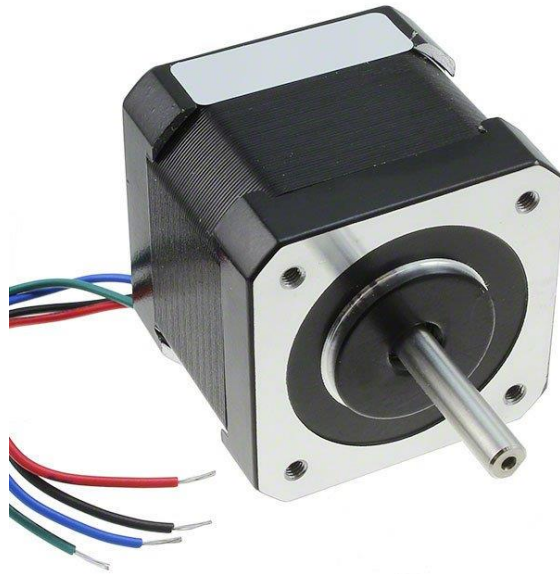


Imagen 4.1.13: Motor paso a paso QSH4218-41-10.

A partir de los datos facilitados por el fabricante, se ha hecho una aproximación con las medidas que se muestran a continuación.

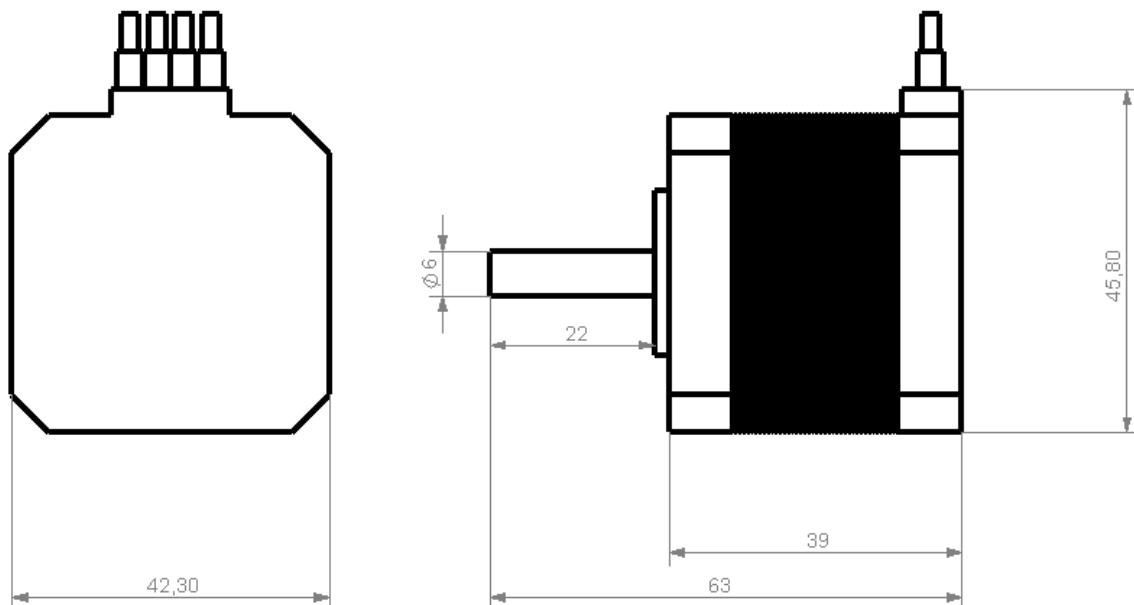


Imagen 4.1.14: medidas del stepper.

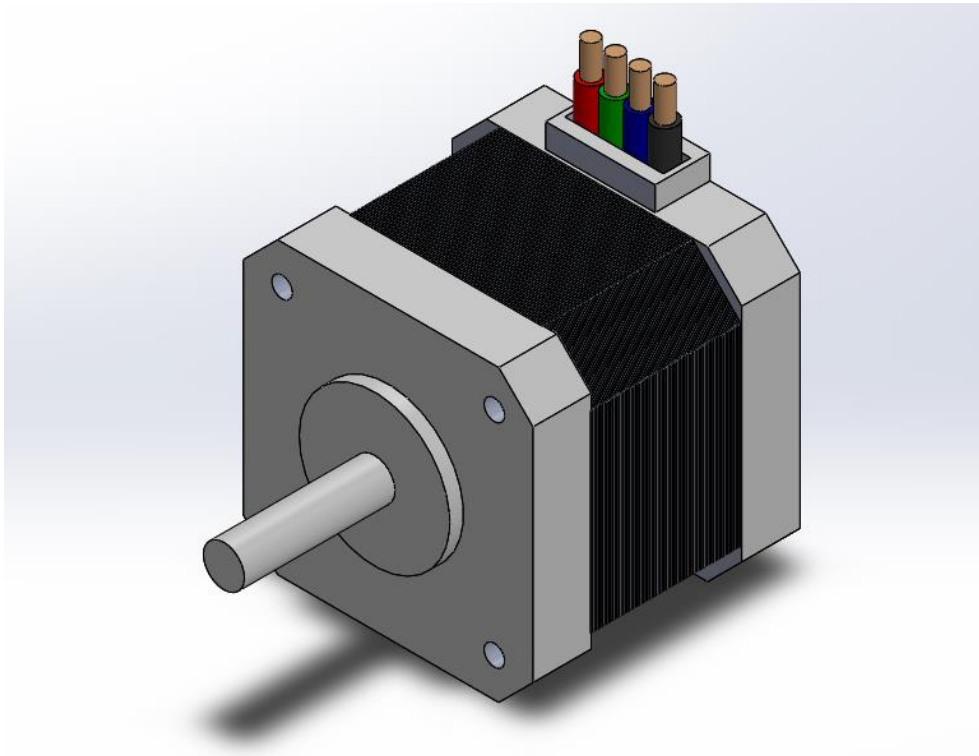


Imagen 4.1.15: Vista isométrica del stepper QSH4218-41-10.

Este motor paso a paso se sirve de un engranaje de 22 dientes y un tornillo sinfín para engranarse al eje vertical del motor eléctrico que propulsa la baliza.

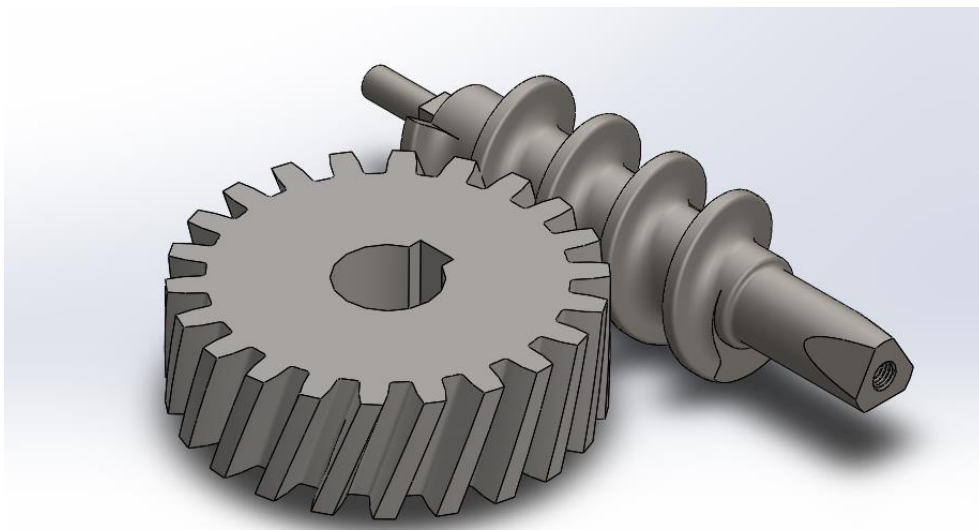


Imagen 4.1.16: Engranaje de 22 dientes y sinfín.

El ensamblaje final del sistema de dirección se muestra a continuación.

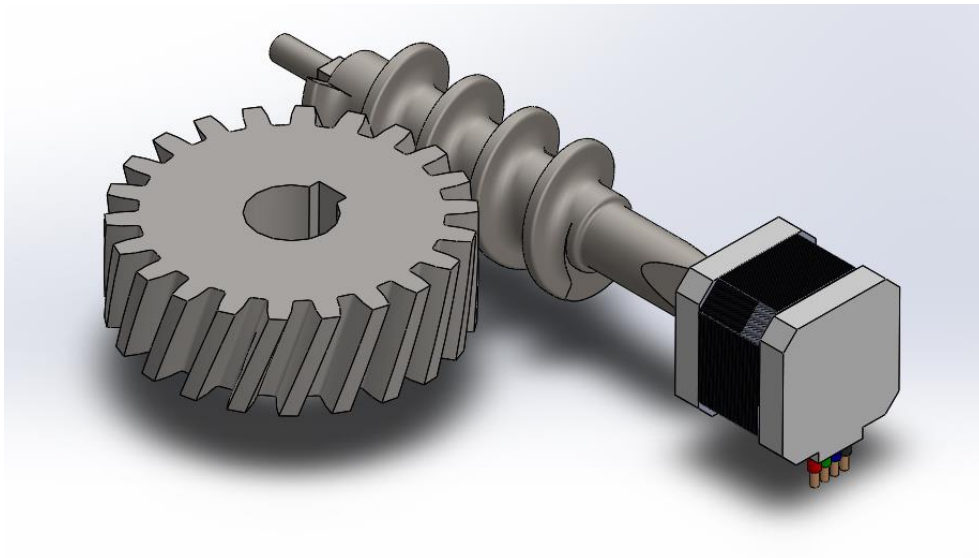


Imagen 4.1.17: Ensamblaje del sistema de dirección.

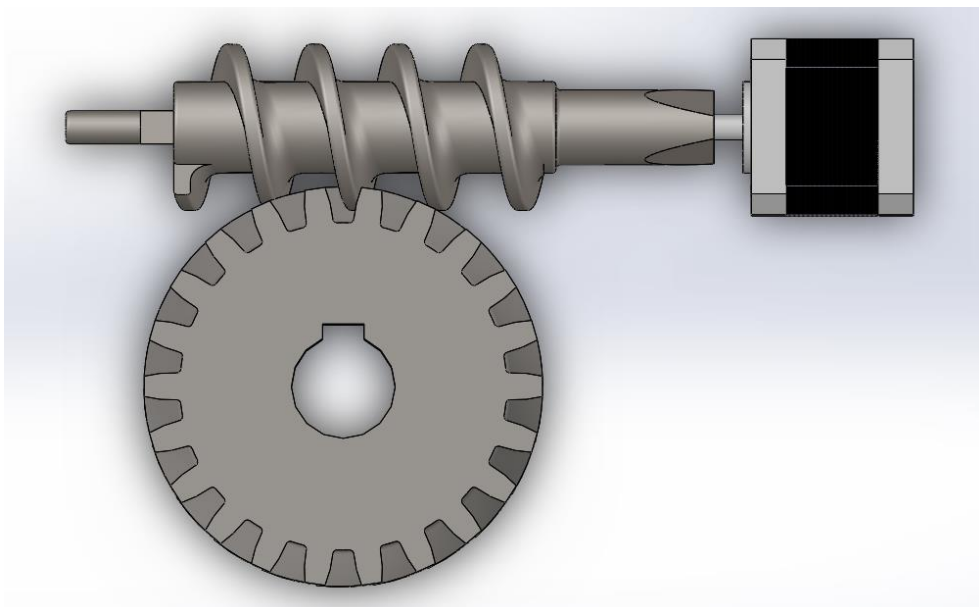


Imagen 4.1.18: Vista superior del sistema de dirección.

El engranaje al motor se realiza mediante la pestaña que comparten tanto el eje con el engranaje, un pasador de seguridad evita el movimiento relativo entre ellos.

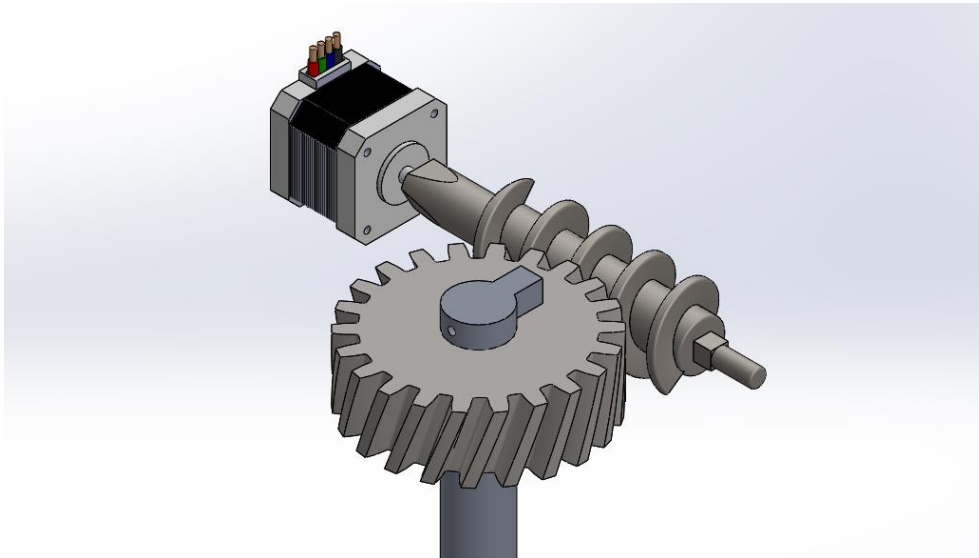


Imagen 4.1.19: Ensamblaje del sistema de dirección con el eje del motor.

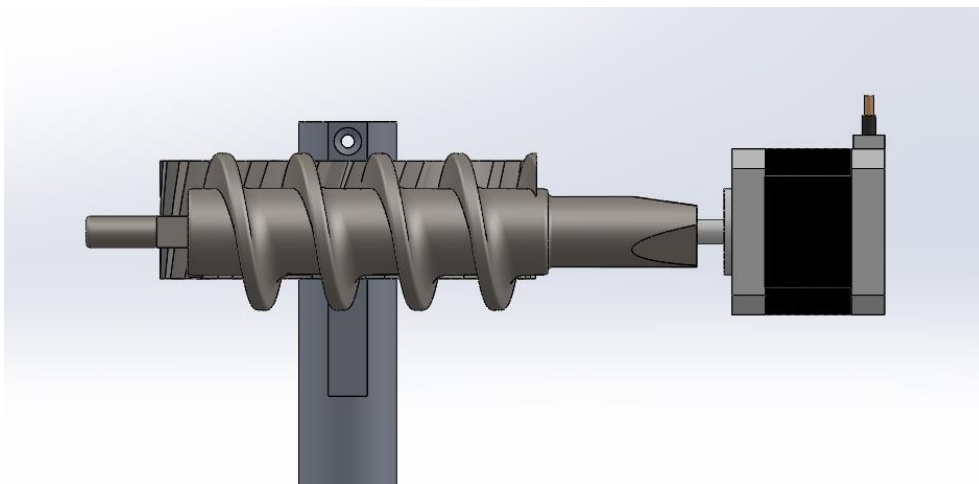


Imagen 4.1.20: Vista frontal del ensamblaje del sistema de dirección con el eje del motor.

Para sostener el motor y el sinfín, se han diseñado dos soportes.

El soporte para el motor paso a paso es una caja hecha a medida de aluminio, que se atornilla a la parte frontal del motor.

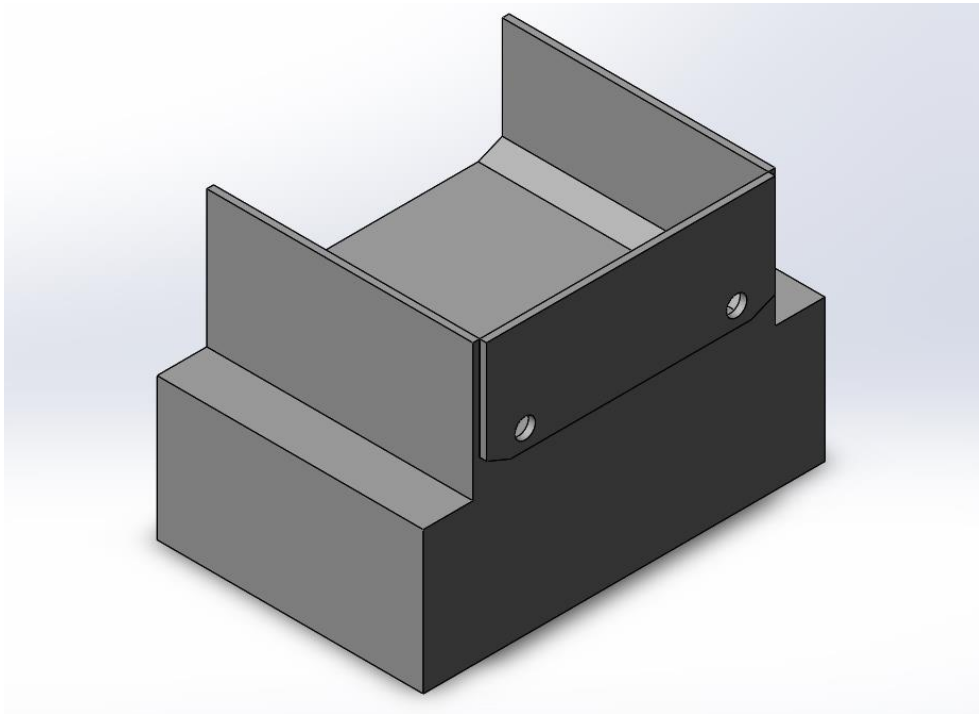


Imagen 4.1.21: Soporte del motor paso a paso.

Este soporte tiene las medidas que se muestran en la siguiente página.

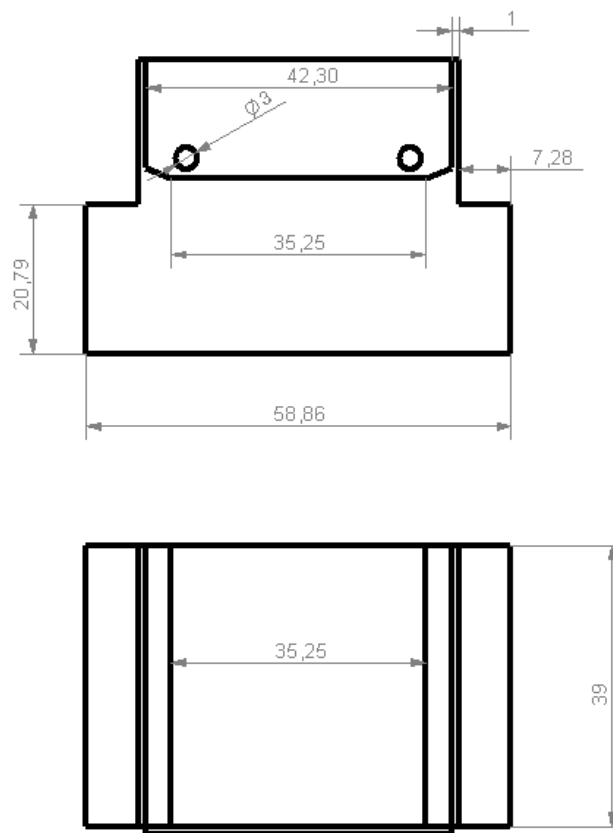


Imagen 4.1.22: Medidas del soporte para el motor paso a paso.

Para el sinfín se ha realizado un soporte sencillo que permite sujetarlo por el extremo contrario a donde va sujeto al motor paso a paso. El propio soporte va atornillado al suelo.

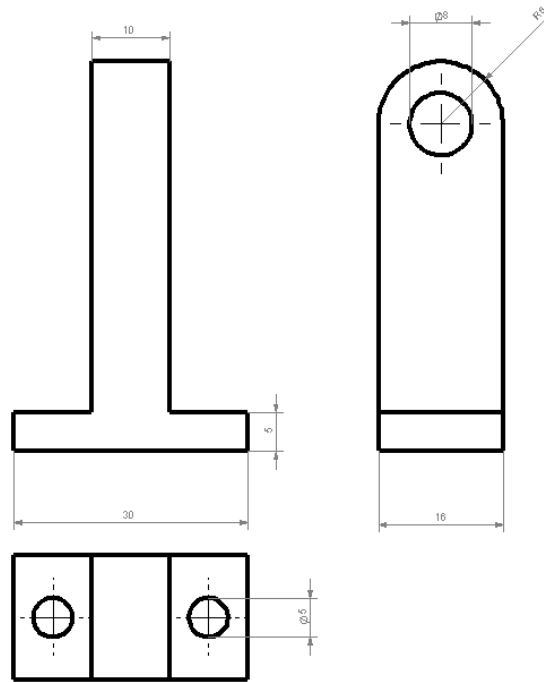


Imagen 4.1.23: Medidas del soporte para el sinfín.

– Elección de los elementos de control:

Para este proyecto es necesario trabajar con una placa de desarrollo que permita procesar toda la información generada por los diferentes sensores del propio vehículo, así como la información procedente desde la base para que sea capaz de realizar la trayectoria marcada correctamente. La placa utilizada para el proyecto es Arduino UNO debido al potencial que nos proporciona para llegar a los objetivos marcados, la facilidad de uso y el gran número de proyectos que hay actualmente con Arduino nos permite aprender rápidamente el funcionamiento de la placa para los posteriores conexiones.

Esta placa es conocida por su fácil implementación en cualquier proyecto del campo de la ingeniería. Sus medidas están marcadas por el fabricante y la aproximación en *SolidWorks* está realizada con la ayuda de una librería online. Basta con conectarla con la batería al potencial adecuado y empezar a trabajar.

Modelo	Arduino UNO
Dimensiones	10,1x5,3x1 cm
Power range	5 V (7-12 V límites)
Pins digitales	14
Entradas analógicas	6
Microcontrolador	ATmega328
DC Current pins	40 mA
Memoria Flash	32 KB
Memoria RAM	8 KB
Velocidad del procesador	16 MHz

Tabla 4.1.1: Características placa Arduino UNO

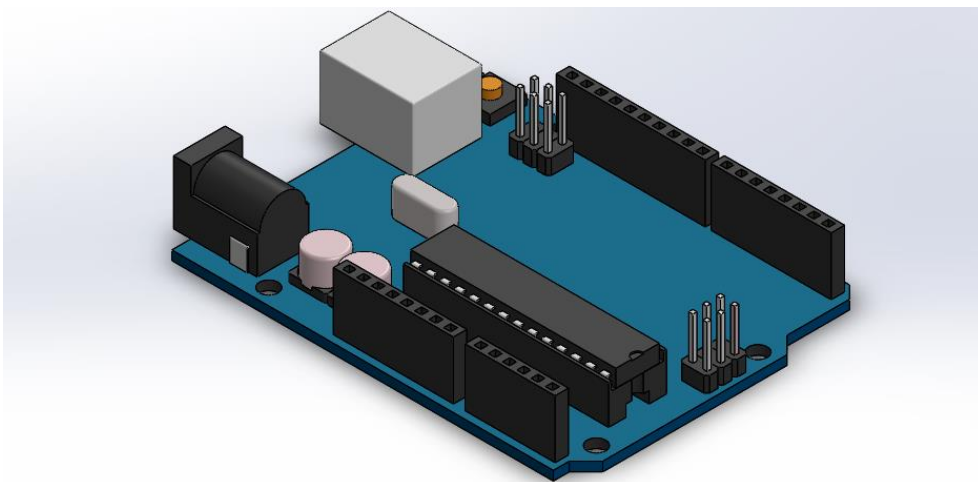


Imagen 4.1.24: Placa Arduino UNO.

Para este proyecto, es necesario el uso de un *shield* para el giro del motor. Como ya se ha visto anteriormente, un pin de Arduino solo puede tener los valores de 0 y 5 V y dar hasta 40 mA. Esto es insuficiente para mover un motor del tipo que sea, por lo tanto, si queremos que Arduino maneje un motor, deberemos usar un *shield*. Gracias a este *shield* se consigue amplificar la corriente y convertirla en señal de alta corriente para que pueda alimentar el motor. El giro se realizará mediante un motor *stepper*, que permitirá girar un determinado ángulo el motor y así poder realizar las trayectorias de giro y posibles correcciones de rumbo. Para llevar a cabo esta tarea se usará el Motor Shield Rev3 que funciona exclusivamente con Arduino Uno.

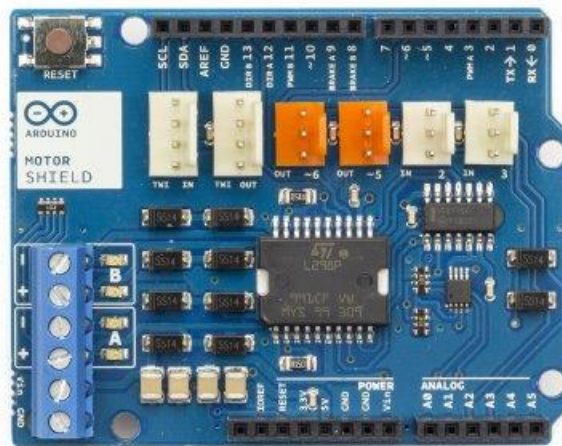


Imagen 4.1.25: Motor Shield

Convertidor

Como se ha comentado anteriormente, el convertidor DC/DC es un elemento esencial para poder usar toda la parte de electrónica de control a partir de nuestra batería. El convertidor seleccionado es el modelo PSD-15A-05 del fabricante *Mean Well* que permite reducir los 16 V de la batería hasta los 5 V necesarios para los componentes.

Medidas proporcionadas por el fabricante: 153 x 83 x110 mm.

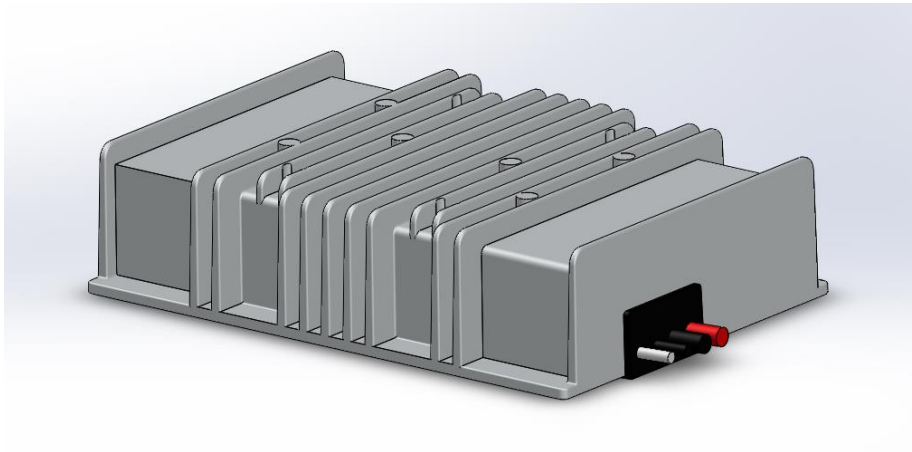


Imagen 4.1.25: Controlador DC/DC para el uso de la electrónica digital.

Sistema de iluminación y sensores

El sistema de iluminación está formado por un tubo de aluminio de 5 mm de espesor que alberga en su parte superior una luz led. Además, este soporte contiene, debajo de la luz, una caja que contiene los sensores de obstáculos.

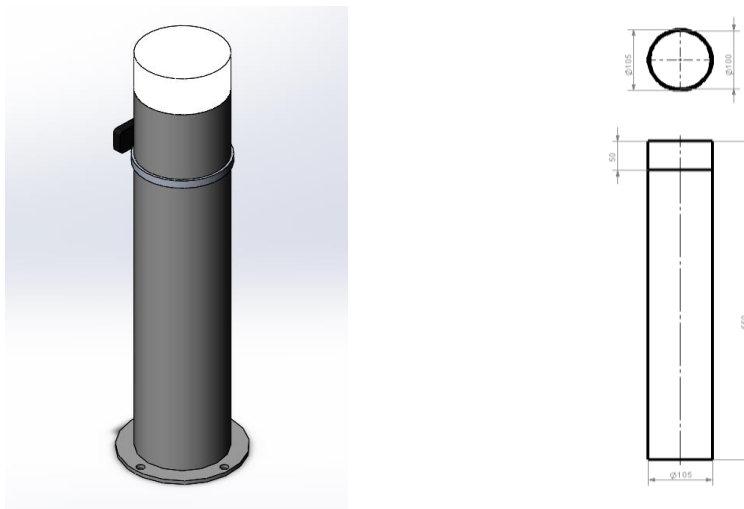


Imagen 4.1.26: A la izquierda el sistema de iluminación ensamblado; a la derecha las medidas del soporte principal y la luz superior.

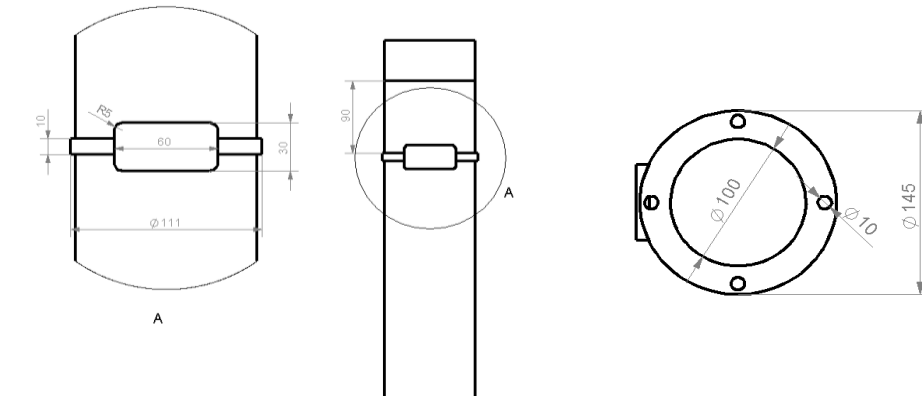


Imagen 4.1.26: A la izquierda las medidas del soporte y la caja que contiene los sensores; a la derecha las medidas del soporte inferior del sistema de iluminación.

Cada uno de los componentes que se detallan a continuación, está directa o indirectamente relacionado con la placa base, que es la encargada de generar todas las instrucciones necesarias para el funcionamiento correcto del vehículo.

Sensor de detección de obstáculos

La función de este elemento es detectar obstáculos cercanos en la trayectoria del vehículo para frenar y redirigir la trayectoria. El producto escogido es *TF Mini LiDAR Laser Range Sensor*, se trata de un sensor láser unidireccional basado en el *Time-Of-Flight* (TOF). Consiste en un sistema óptico y electrónico que mediante un algoritmo es capaz de medir la distancia a un objeto hasta a 12 metros.

Modelo	TF Mini LiDAR Laser Range Sensor
Dimensiones	42x15x16 mm
Power range	DC 4.5~6 V
Temperatura de trabajo	0~60 °C
Interfaz de comunicación	UART
Rango de trabajo	0.3m-12m (indoor)
Rango de precisión	1% (<6m), 2%(6-12m)

Frecuencia de cálculo	100Hz
Consumo medio	0.6 W

Tabla 4.1.27: Especificaciones del sensor de obstáculos.

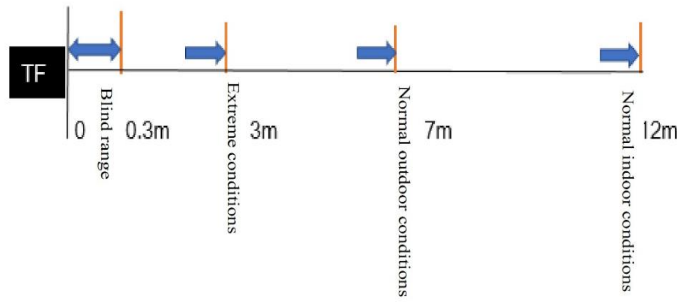


Imagen 4.1.28: A la izquierda se puede observar el funcionamiento del sensor y a la derecha se muestra el sensor.

Sensor de posición

Con las posibilidades que ofrece el mercado actualmente, la mejor opción sería un sistema diferencial GPS (DGPS). Ofrece una precisión inferior al metro y algunos sensores hasta cinemática integrada en tiempo real. Un ejemplo de modelo con el que se pretendía trabajar es el NEO-M8P-0 que ofrece las siguientes características:

Modelo	NEO-M8P-0
Dimensiones	12.2x16x2.4 mm
Temperatura de trabajo	-40~+85 °C
Power range	DC 2.7~3.6 V
Transferencia de datos	125 kB/s
Rango de subida de datos	5 Hz
Precisión	±50cm

Tabla 4.1.2: Especificaciones del sensor de posición DGPS.



Imagen 4.1.29: Sensor de posición DGPS.

Desgraciadamente, los sistemas DGPS tienen un alto coste y es necesario un contrato para utilizarlo. Además, presenta dificultades en la conexión con Arduino por lo cual se debe trabajar con un sistema GPS que resulta un sistema más económico, pero no tan preciso. Al necesitar una gran precisión, se crea en el puerto escogido nuestro propio sistema diferencial capaz de corregir los errores de precisión en las coordenadas del vehículo.

Para hacerlo, será necesario el uso de 3 GPS externos al vehículo y además un GPS conectado al Arduino. Estos GPS estarán situados en 3 distintos puntos del puerto con su debido sistema de transmisión que los conecte con el sistema central. El objetivo es conocer previamente las coordenadas exactas de los 3 GPS situados en 3 distintos puntos del puerto y, posteriormente, compararlas con las coordenadas actuales que proporcionan estos 3 GPS, la diferencia que podremos apreciar entre ambas coordenadas nos servirá para estimar y ser capaces de corregir el error presente en la zona. Se realiza una media de los errores que se reciben de los GPS y se aplica un factor corrector a la localización que se recibe por parte de la baliza.

Mediante el uso de este sistema se consigue mejorar la precisión de un GPS convencional que trabaja con una precisión mayor a la requerida para nuestro proyecto y nos permite trazar mejores trayectorias.

Los GPS utilizados para determinar la posición serán el modelo GY-GPS6MV2 que se trata de un módulo ideal para controlar con Arduino.

Modelo	GPS6MV2
Dimensiones	18x16 mm
Power range	3-5 V
Temperatura de trabajo	-20~+75 °C
Precisión	±2,5 m

Tabla 4.1.3: Especificaciones del GPS.



Imagen 4.1.30: Sensor de posición GPS.

A parte de conocer la posición del vehículo, también es necesario saber su orientación, para ello se utiliza una brújula que se conecta directamente a la placa base del Arduino y nos permite en qué dirección se encuentra el vehículo. Para realizar este trabajo de orientación se escoge el magnetómetro HMC5883L que permite realizar las lecturas correspondientes del campo magnético y obtener los componentes X, Y y Z.

Modelo	HMC5883L
Dimensiones	18x16 mm
Power range	3.3-5 V
Temperatura de trabajo	-25~+80 °C
Precisión	±2°C
Rango de medición	±0.88 ~ ±8.1 Ga

Tabla 4.1.4: Especificaciones de la brújula.



Imagen 4.1.31: Módulo de la brújula

Cuenta con dos modos de funcionamiento, el modo continuo donde el magnetómetro está constantemente realizando mediciones y actualizando los registros de x, y, z correspondientes a las lecturas. Mientras tanto, el otro modo consiste en realizar una medida solo cuando el Arduino le solicite.

Controlador del motor

Para que el vehículo sea capaz de realizar las trayectorias es necesario un controlador PID (controlador Proporcional Integrador Derivativo). Este mecanismo de control que se implementará permite regular la velocidad y posición de un trayecto del vehículo.

El controlador escogido es el KBS-X Mini Brushless Motor Controller del fabricante *Kelly Controller*. Se trata de un controlador programable que proporciona un control eficiente, suave y silencioso usado generalmente en motocicletas eléctricas. El controlador usa transistores MOSFET de alta potencia que mediante PWM (*Pulse width modulation*) consigue una eficacia del 99% en la mayoría de los casos. Un potente microprocesador proporciona un control completo y preciso al motor. Al tratarse de un controlador programable permite a los usuarios configurar parámetros, realizar pruebas y obtener información de diagnóstico de manera rápida y sencilla.

Modelo	KBS24051X
Dimensiones	108x78x41 mm
Power range	8-30 V
Temperatura de trabajo	-40~+100 °C
Frecuencia de trabajo	16,6 kHz
Entradas Freno/Acelerador	0-5 V
Consumo en uso	30 mA

Tabla 4.1.5: Especificaciones del controlador.



Imagen 4.1.32: Controlador Kelly.

El controlador Kelly es un elemento muy usado en la industria, y por ello sus medidas son más conocidas y están estandarizadas. Es por ello que dadas las medidas exteriores del fabricante y con la ayuda de una librería online⁶, se ha podido hacer una aproximación muy exacta y adaptada a nuestro controlador.

Medidas proporcionadas por el fabricante: 108 x 78 x 41 mm.

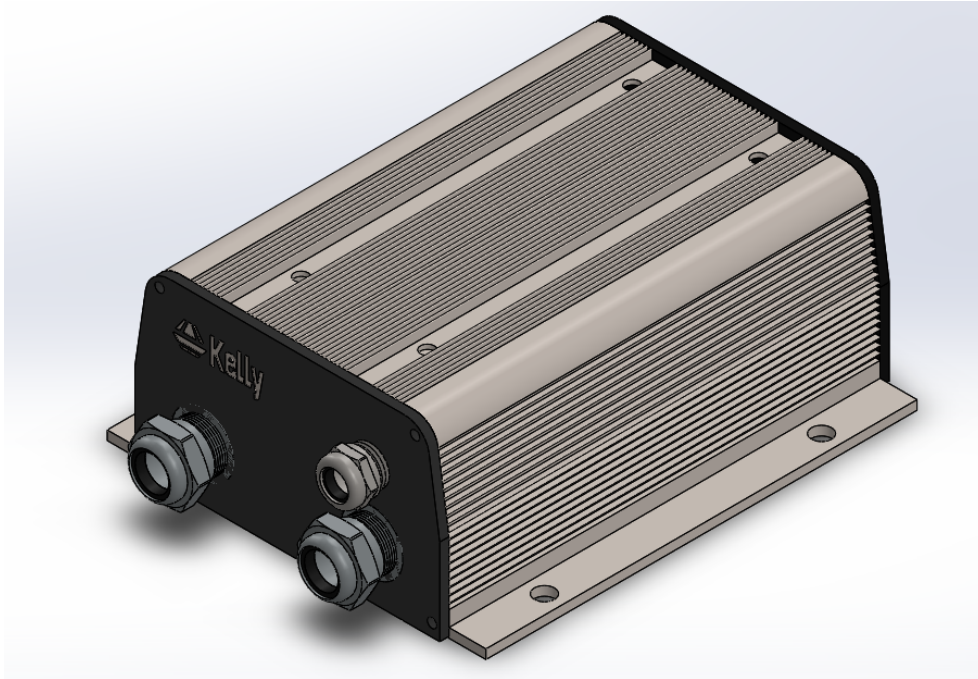


Imagen 4.1.33: Controlador Kelly a partir de los datos proporcionados por el fabricante.

⁶ Librería GrabCad

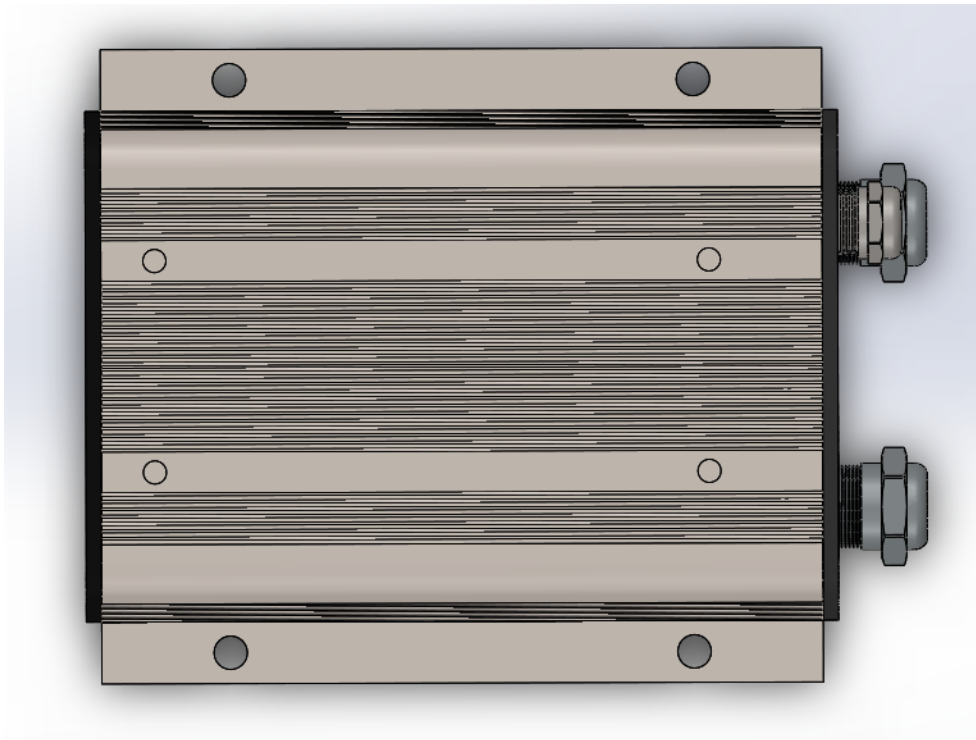


Imagen 4.1.34: Vista superior del controlador Kelly.

– Elección del sistema de comunicación

En este apartado, es necesario conocer a que distancia máxima debe comunicar el vehículo con la base. Tal y como están diseñados los puertos actualmente, se considera que una distancia de 2 Km es más que suficiente para transmitir toda la información. Es por eso por lo que se ha escogido el F8L10 Series LoRa Module, se trata de un sistema de transmisión multi-ajutable con capacidad de transmitir a larga distancia con una gran habilidad para evitar interferencias.

Modelo	F8L10D-E
Dimensiones	24.4x45.0x4.2 mm (sin antena)
Peso	5.0 g
Power range	DC 3.3~5 V / 1A
Temperatura de trabajo	-40~+85 °C
Frecuencia de banda	410MHz-441MHz (recomendado 433±5MHz)

Distancia de transmisión urbana o <i>indoor</i>	2km
Distancia de transmisión campo abierto o <i>outdoor</i>	11,5km
Potencia de transmisión	1W
Ancho de banda	6 niveles de selección (0.3,0.6,1.0,1.8,3.1,5.5 Kbps)
Sensibilidad	-140Bm
Máxima información generada	4K Bytes
Consumo transmitiendo información	180~200mA@ 5VDC(Máximo Pulso de Corriente \leq 400mA)
Consumo recibiendo información	<22 mA@5VDC
Consumo en uso	<3.0uA@5VDC
Consumo en reposo	<2.0uA@5VDC

Tabla 4.1.6: Especificaciones del sistema de comunicación.



Imagen 4.1.35: Sistema de comunicación.

Una vez elegidos todos los elementos, se debe comprobar que el dimensionado geométrico es válido. Para ello, como se ha comentado anteriormente, se usa el programa asistido por ordenador Solid Works.

Para ordenar los elementos a través del casco se han tenido en cuenta algunas premisas:

- Los elementos deben quedar dispuestos de manera que el centro de gravedad quede lo más cerca posible del centro de presiones. De esta manera se consigue una mayor estabilidad de la baliza.
- La batería debe adoptar la posición más central posible ya que es el elemento más pesado. El controlador adoptará una posición más avanzada en el casco para compensar el peso del motor.
- Los demás elementos se situarán alrededor para intentar compensar el desajuste entre centro de gravedad y centro de presiones.
- Debe quedar un espacio libre en la zona del eje del motor para el diseño del sistema de dirección.

Finalmente, podemos ver que el diseño conceptual es correcto y que cumplimos el dimensionado geométrico ya que todos los elementos esenciales pueden ser distribuidos a través del casco, tal y como se muestra a continuación.

Dimensiones de los elementos esenciales:

- Batería: 282 x 155 x 248 mm
- BMS: 133 x 86 x 110 mm
- Convertidor: 153 x 83 x 110 mm
- Arduino: 101 x 53 x 10 mm
- Motor: 305.4 x 120 x 110 mm (cilindro central) + complementos
- Controlador: 108 x 78 x 41 mm

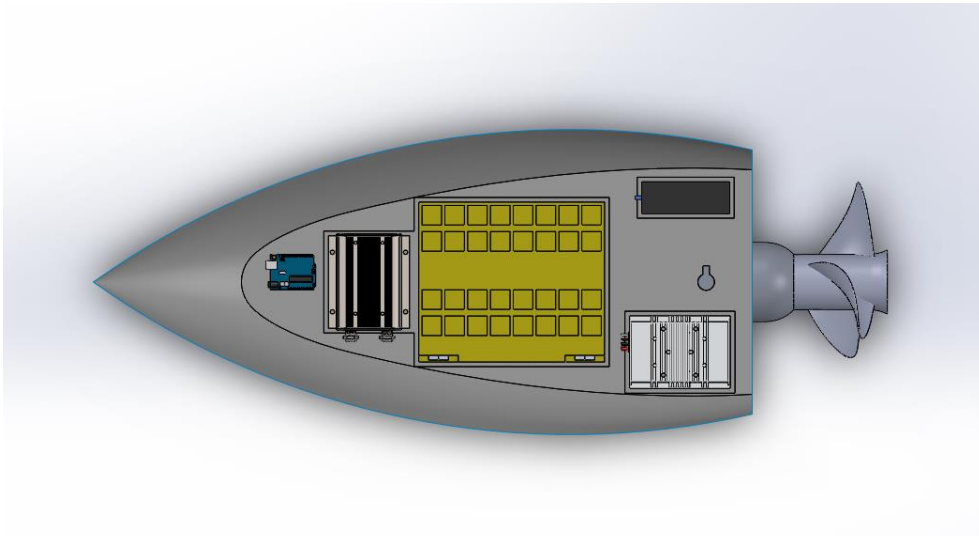


Imagen 4.1.36: Distribución provisional de los elementos esenciales y comprobación del dimensionado geométrico.

Así pues, el casco ha quedado definido con 1 m de eslora. Las medidas complementarias del casco se muestran a continuación.

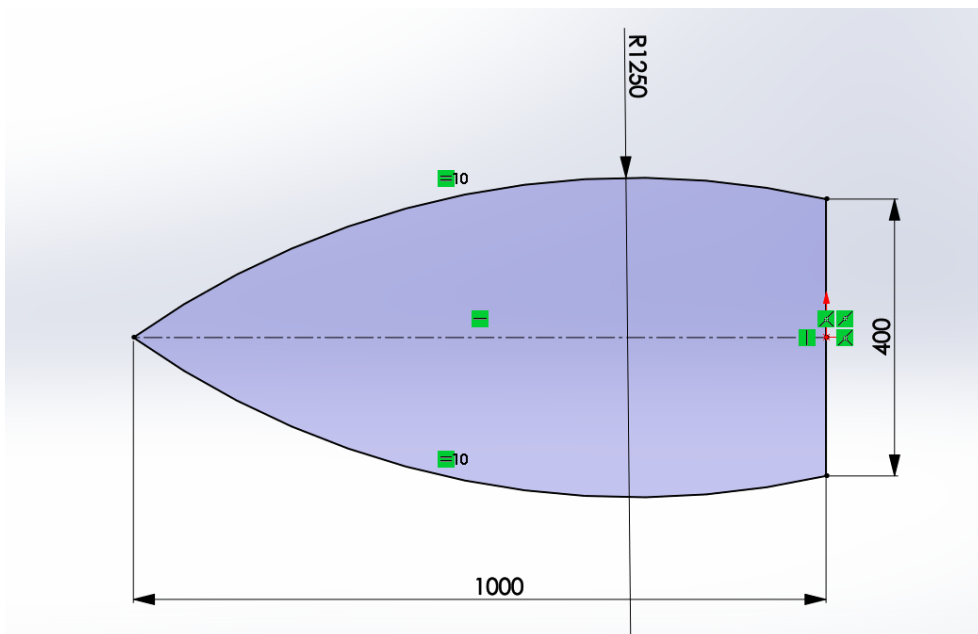


Imagen 4.1.37: Vista superior del casco.

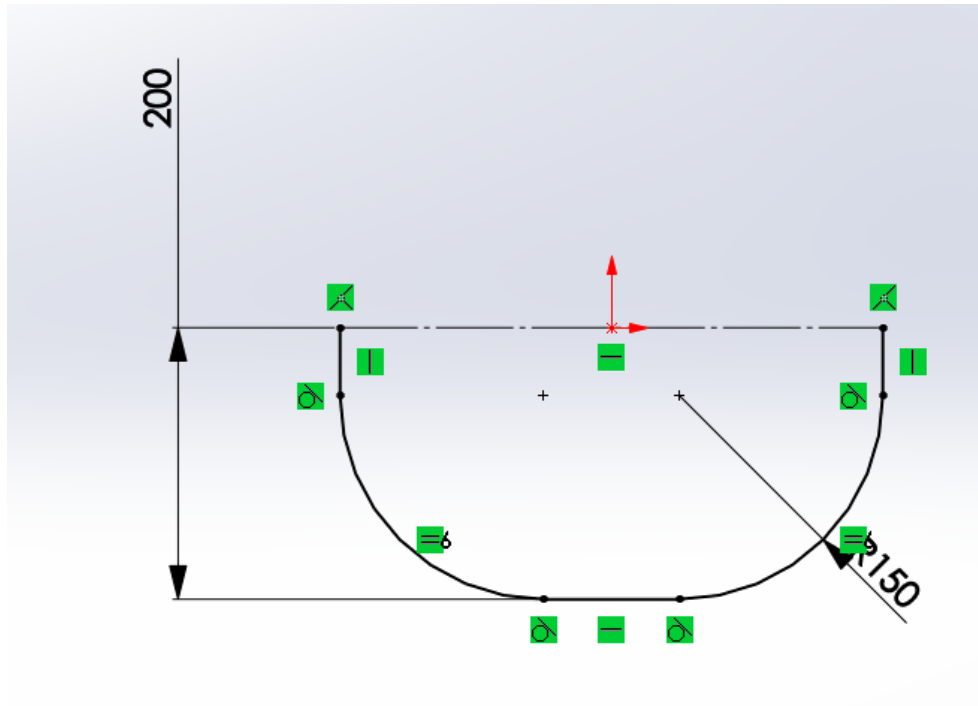


Imagen 4.1.38: Vista lateral del casco.

Este casco está hecho de poliéster con fibra de vidrio, material clásico en la construcción de embarcaciones ligeras. Este material destaca por su ligereza, rigidez y facilidad de deconstrucción.

Características del casco:

- Grosor uniforme = 6 mm
- Área = 609.900 mm²
- Densidad = 2,5 g/cm³
- Masa = 9,1485 Kg

A continuación, se ha diseñado el suelo de la embarcación donde irán todos los elementos. El suelo es una placa de fibra de vidrio de 10 mm de grosor situada 50 mm por encima del punto inferior de la baliza.

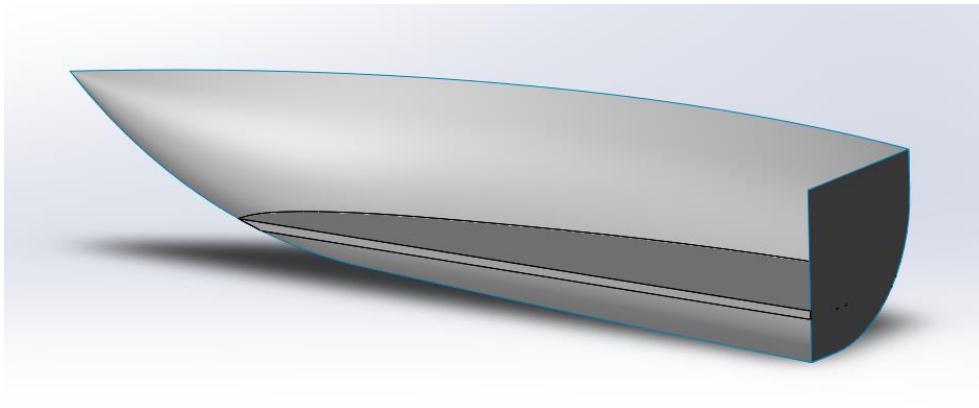


Imagen 4.1.39: Suelo de la baliza.

Este suelo se ha reforzado con unas piezas de fibra puestas en forma transversal, tal y como muestra la siguiente imagen.

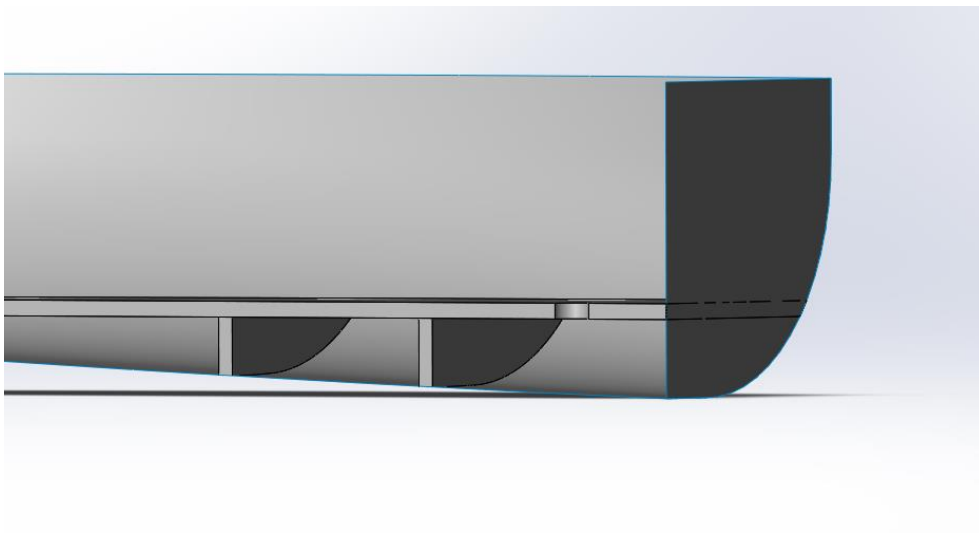


Imagen 4.1.40: Refuerzos transversales para el suelo.

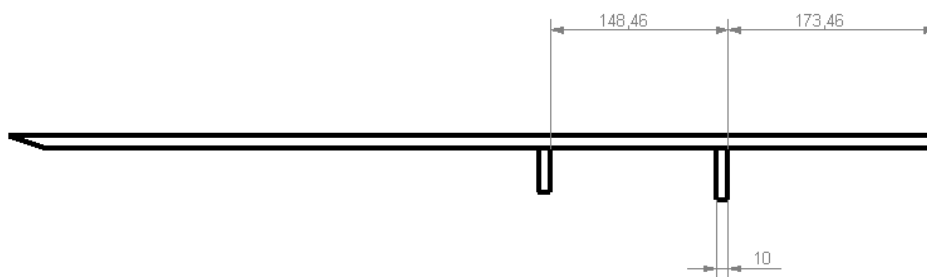


Imagen 4.1.41: Posicionamiento de los refuerzos transversales.

Seguidamente se ha procedido a hacer los refuerzos donde irán atornillados todos los elementos (batería, controlador, ...). Para ello se ha diseñado una placa de aluminio de 5 mm de grosor que queda soldada al suelo de la baliza. Además, se hace un agujero de 25mm de diámetro para pasar el eje del motor.

La placa de aluminio está formada por huecos, dejando un margen de 7 mm, hechos a medida para cada uno de los elementos que formarán la batería.

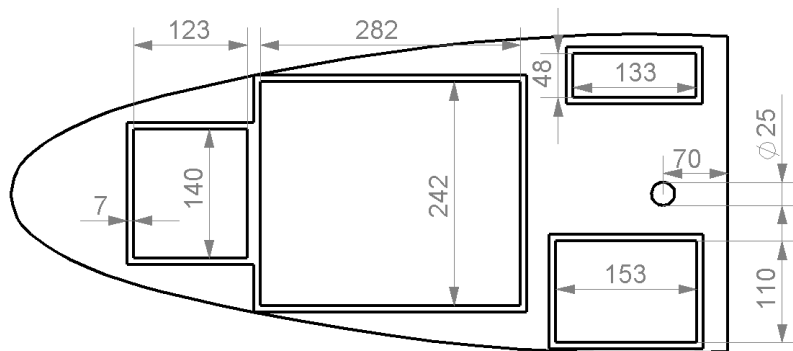


Imagen 4.1.42: Huecos en la placa de aluminio para albergar los elementos esenciales.

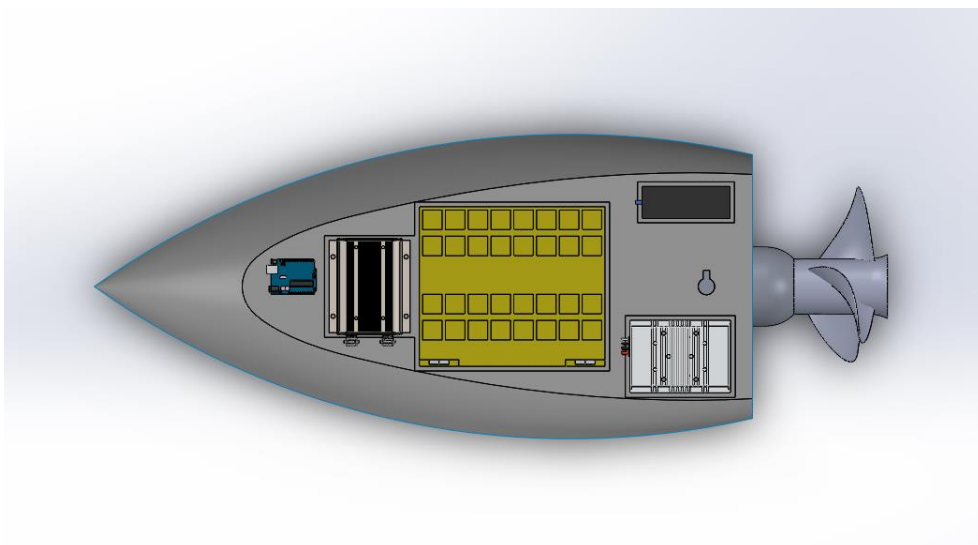


Imagen 4.1.43: Disposición de todos los elementos en sus huecos.

Finalmente, para aumentar la estabilidad de la navegación, se ha decidido incorporar una extensión, de 10 mm de grosor, en la parte inferior de la baliza haciendo las funciones de quilla. Esta se encuentra en posición centrada, como se ve en la imagen siguiente.

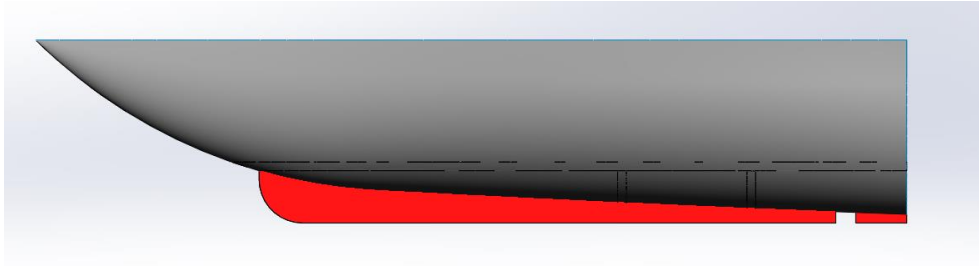


Imagen 4.1.44: Remarcada en rojo, la extensión con funciones de quilla.

De cara a proteger los elementos interiores, se ha dispuesto una tapa protectora de poliéster con fibra de vidrio que cubre todo el casco, con una cavidad central para albergar el sobresaliente de la batería. Esta tapa queda fijada por una bisagra central fijada en la popa.

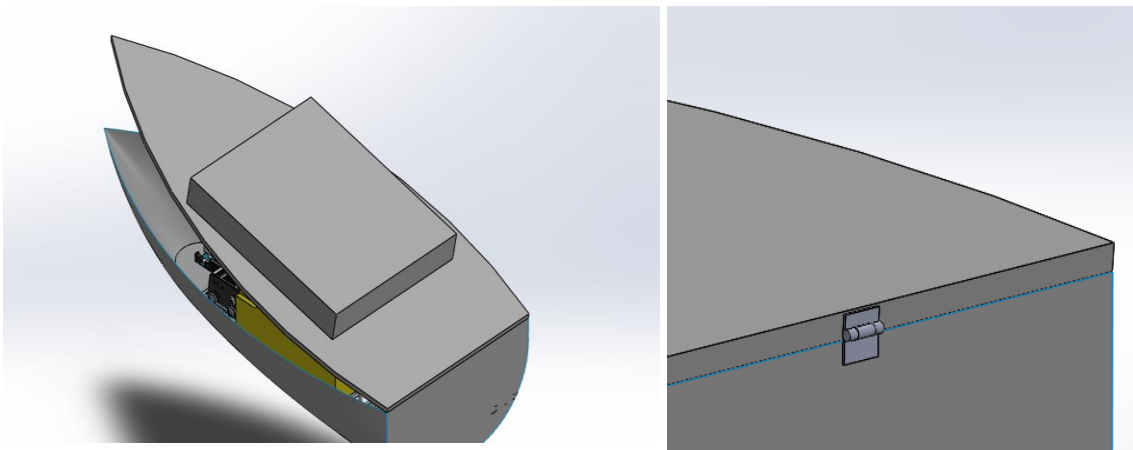


Imagen 4.1.45: Tapa protectora fijada por bisagra en la popa.

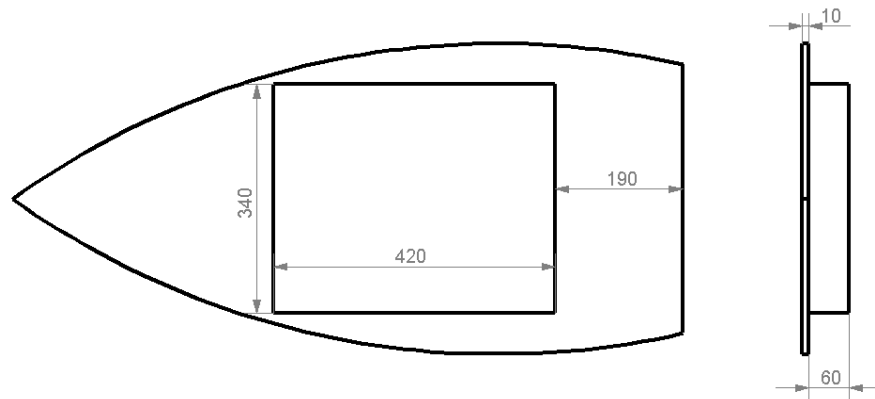


Imagen 4.1.46: Cotas de la tapa protectora superior.

Una vez diseñada la tapa, se han fijado en la parte superior unos tubos roscados salientes de 20 mm de alto que servirán de anclaje, con la ayuda de una tuerca, para el sistema de luz y sensores.

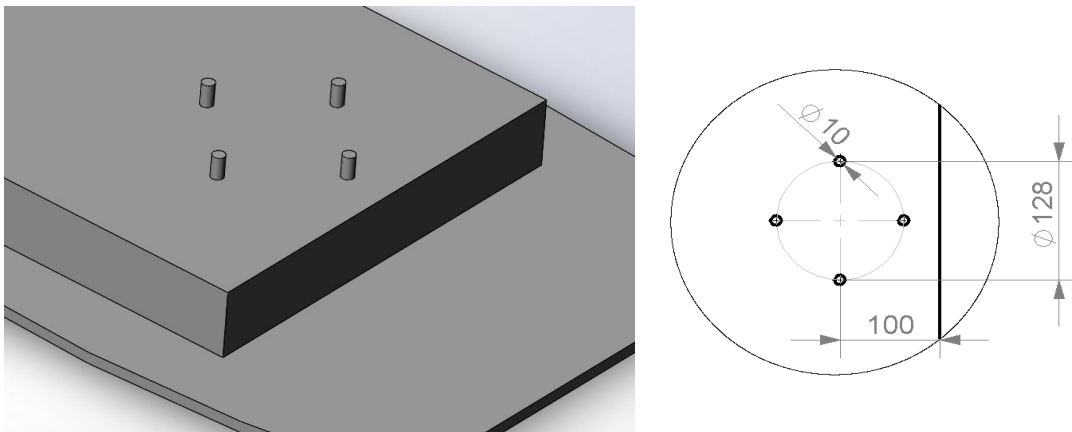


Imagen 4.1.47: Anclaje para el sistema de iluminación y sensores.

Finalmente, el ensamblaje final de la alternativa 1 se puede ver a continuación.

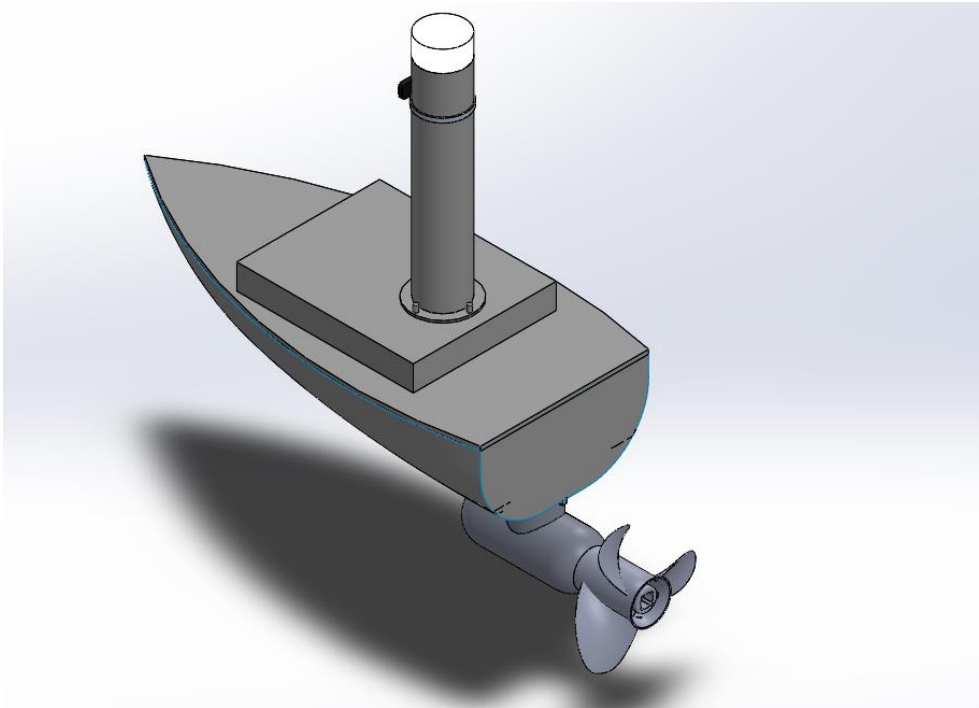


Imagen 4.1.48: Ensamblaje final de la Alternativa 1.

4.2. Alternativa 2

Para definir el concepto de la segunda alternativa, la de casco con forma circular, se siguen los mismos pasos que en la primera alternativa.

– Dimensionado geométrico:

Se parte de un casco circular de diámetro 0,75 m y 0,205 m de altura. El área proyectada es pues de $0,75 \cdot 0,205 = 0,15 \text{ m}^2$.

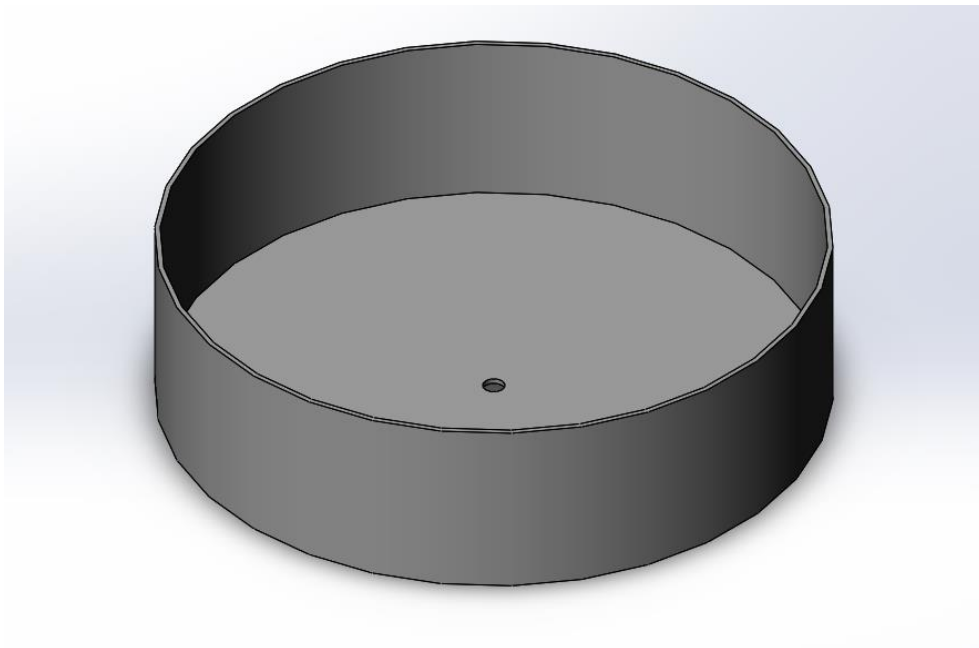


Imagen 4.2.1: Casco de la segunda alternativa.

– Cálculo de las fuerzas de fricción:

Siguiendo los mismos pasos que en el apartado 4.1 y teniendo en cuenta la nueva superficie, se obtiene de nuevo la siguiente gráfica:

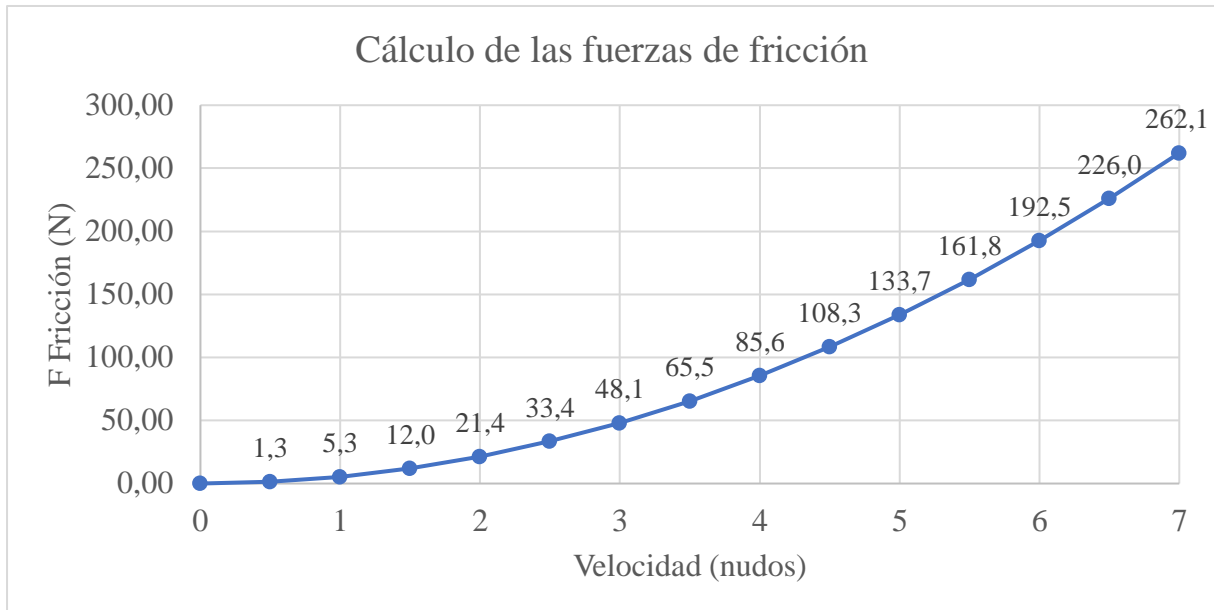


Gráfico 4.2.1: Relación entre la velocidad y las fuerzas de fricción.

Teniendo en cuenta el mismo margen de seguridad que en el apartado 4.1, la fuerza de fricción a 7 nudos es de 262,1 N.

– Cálculo de la potencia necesaria y dimensionado del motor:

Una vez obtenida la fuerza de fricción generada por este casco a velocidad máxima, calculamos la potencia necesaria como el producto de fuerza por velocidad. La potencia necesaria pues es de 943,63 W.

– Dimensionado de las baterías:

Teniendo en cuenta la potencia calculada y la autonomía deseada según especificaciones (2-3 horas), se pueden dimensionar las baterías obteniendo su energía con el producto de potencia por autonomía deseada. Así pues, la energía objetivo o deseada debe oscilar entre 1,887 kWh y 2,831 kWh.

Como se puede ver según el dimensionado e incluyendo un margen de seguridad, los elementos específicos seleccionados para la alternativa 1 son válidos también para la alternativa 2. De cara a una futura comparativa, el factor que ambos vayan equipados con los mismos elementos ayudará a que esta comparación sea más objetiva.

Una vez elegidos todos los elementos, se debe comprobar que el dimensionado geométrico es válido. Para ello, como se ha comentado anteriormente, se usa el programa asistido por ordenador Solid Works.

Para ordenar los elementos a través del casco, al igual que en el punto 4.1 para la alternativa 1, se han tenido en cuenta las siguientes premisas:

- Los elementos deben quedar dispuestos de manera que el centro de gravedad quede lo más bajo posible y que esté centrado con el centro de presiones. De esta manera se consigue una mayor estabilidad de la baliza.
- Como el motor se dispondrá en posición central, la batería debe adoptar la posición más centrada posible ya que es el elemento más pesado. El controlador y demás elementos se situarán alrededor para intentar compensar el desajuste entre centro de gravedad y centro de presiones.
- Debe quedar un espacio libre en la zona del eje del motor para el diseño del sistema de dirección.

De manera provisional, se puede ver que el diseño conceptual es correcto y que cumplimos el dimensionado geométrico ya que todos los elementos esenciales pueden ser distribuidos a través del casco, tal y como se muestra a continuación. Además, ésta es la configuración límite del casco debido al tamaño de las baterías.

Dimensiones de los elementos esenciales:

- Batería: 282 x 155 x 248 mm
- BMS: 133 x 86 x 110 mm
- Convertidor: 153 x 83 x 110 mm
- Arduino: 101 x 53 x 10 mm
- Motor: 305.4 x 120 x 110 mm (cilindro central) + complementos
- Controlador: 108 x 78 x 41 mm

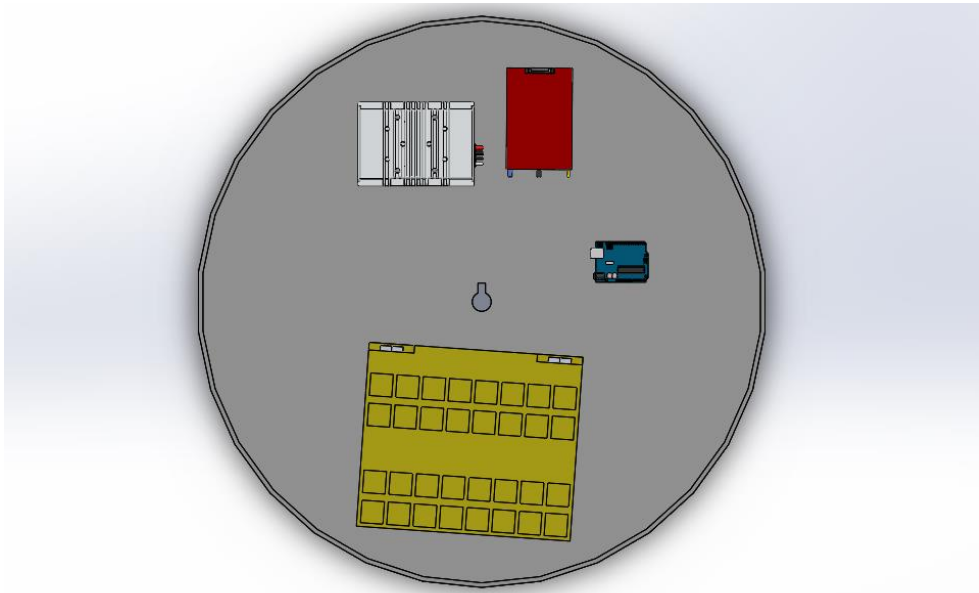


Imagen 4.2.2: Distribución provisional de los elementos esenciales y comprobación del dimensionado geométrico de la alternativa 2.

A continuación, se muestra en detalle el casco y la estructura que lo compone para albergar todos los elementos de la baliza.

Cabe recordar que queda fuera del alcance de este proyecto la optimización del casco de la baliza y éste ha quedado definido anteriormente, con 0,75m de diámetro. Éste está hecho de fibra de vidrio y con un espesor de 6mm. Las medidas del casco se muestran a continuación.

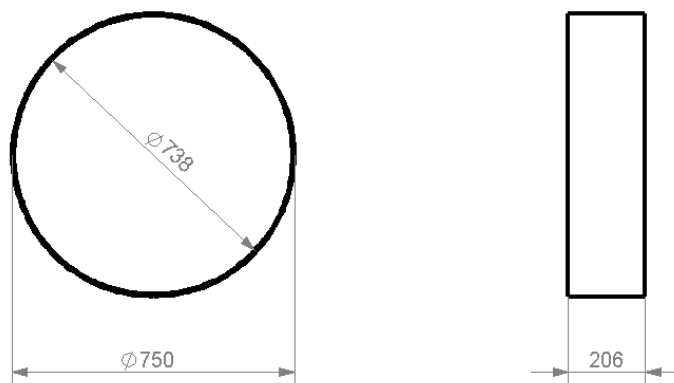


Imagen 4.2.3: Medidas del casco de la Alternativa 2.

Además, igual que en la Alternativa 1, se ha buscado una forma para aumentar la estabilidad tanto en navegación como en maniobras.

Para asegurar la mayor estabilidad de maniobras, se ha tenido como ejemplo el caso de los helicópteros. Un helicóptero lleva dos hélices, la primera para crear la fuerza de sustentación y una segunda para evitar que el helicóptero también adopte una velocidad angular generada por el par de la hélice primaria. Así pues, la segunda hélice se opone al par generada por la principal.

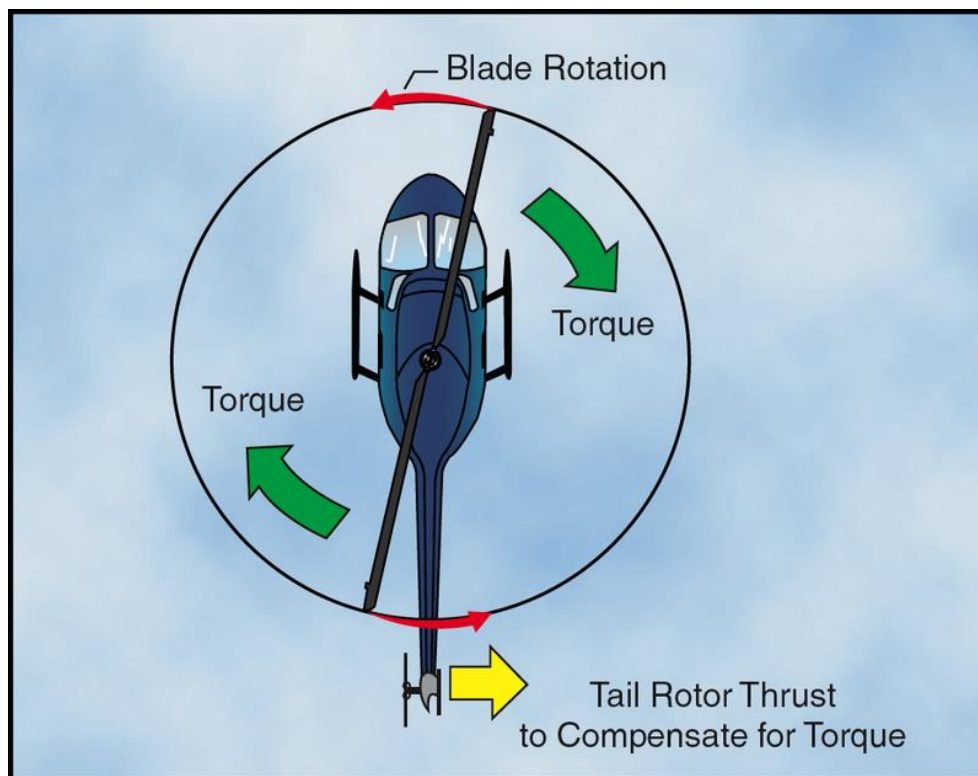


Imagen 4.2.4: Funcionamiento de los rotors de un helicóptero.

Siguiendo este mismo ejemplo, y con tal de buscar una compensación a las rotaciones que podrían aparecer en fases de maniobras, se han pensado dos posibles sistemas:

- Unas quillas radiales a modo de freno contra las rotaciones.
- Dos motores en los extremos, puestos en avance opuesto, para compensar las rotaciones de manera mecánica (igual que haría el rotor auxiliar del helicóptero).

Finalmente, se ha creído que con la implementación de las quillas el sistema conseguirá frenar las rotaciones que puedan aparecer en fases de maniobras.

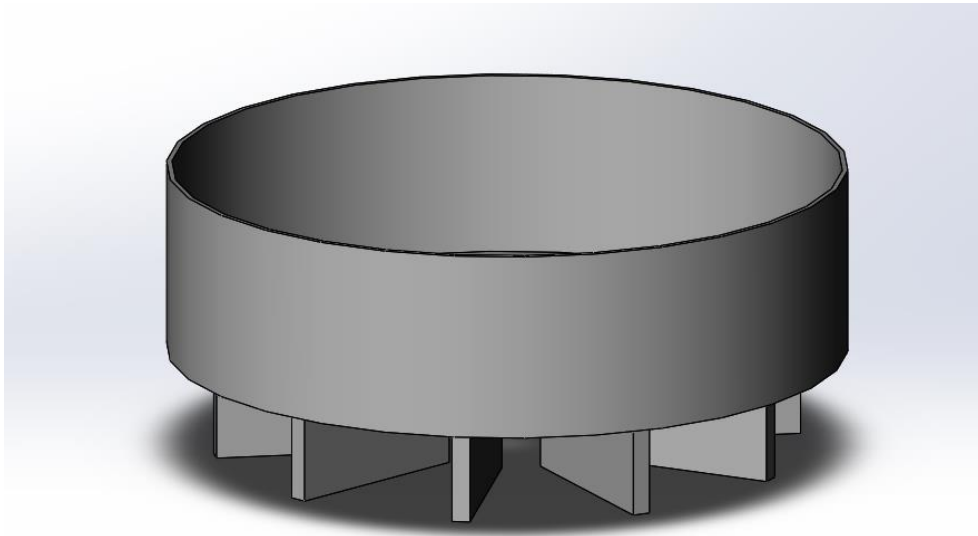


Imagen 4.2.5: Quillas radiales para mitigar la aparición de rotaciones.

Estas quillas están dispuestas de forma radial y están hechas de poliéster con fibra de vidrio, al igual que el casco. En total son 10 quillas dispuestas cada 36 grados, de 20 mm de grosor y 225 mm de largo. Tienen una profundidad de 110 mm, la máxima admisible para dejar espacio suficiente para la rotación de 360 grados del motor. Además, se ha dejado una distancia de 50 mm desde la parte exterior del casco al inicio de la quilla.

De esta manera se cree que se conseguirá disminuir el momento que aparecería cuando el motor rotase un determinado ángulo y la reacción haría que el casco lo hiciera en dirección contraria.

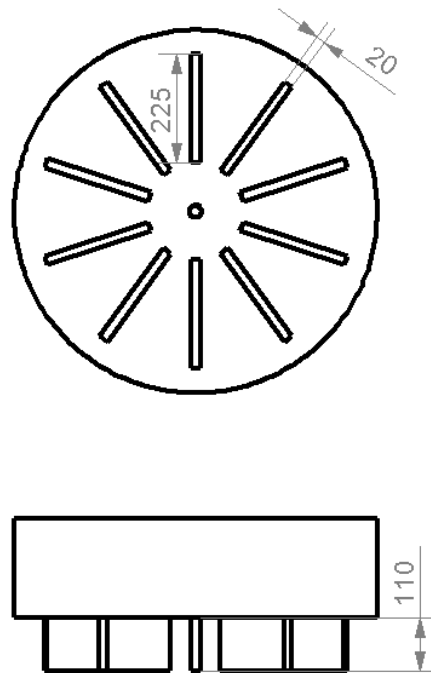


Imagen 4.2.6: Medidas de las quillas.

Igual que con la Alternativa 1, al suelo del casco se han soldado unas plantillas de aluminio donde irán encajados los elementos de la baliza. Como se puede ver a continuación, se ha resuelto la disposición geométrica de tal manera que:

- Los elementos quedarán lo más distribuidos respecto al centro de la baliza para intentar que el centro de gravedad de la embarcación no se desplace demasiado e influya a la estabilidad en maniobra y navegación.
- El primer elemento que se ha dispuesto es el sistema de dirección, pues es el elemento que se engrana con el eje vertical del motor.
- Seguidamente, se ha puesto la batería, ya que es el elemento de mayor volumen y peso.

- Finalmente, se ha intentado compensar la disposición de la batería situando el resto de los elementos en la banda contraria para equilibrar el centro de gravedad manteniéndolo lo más centrado posible.

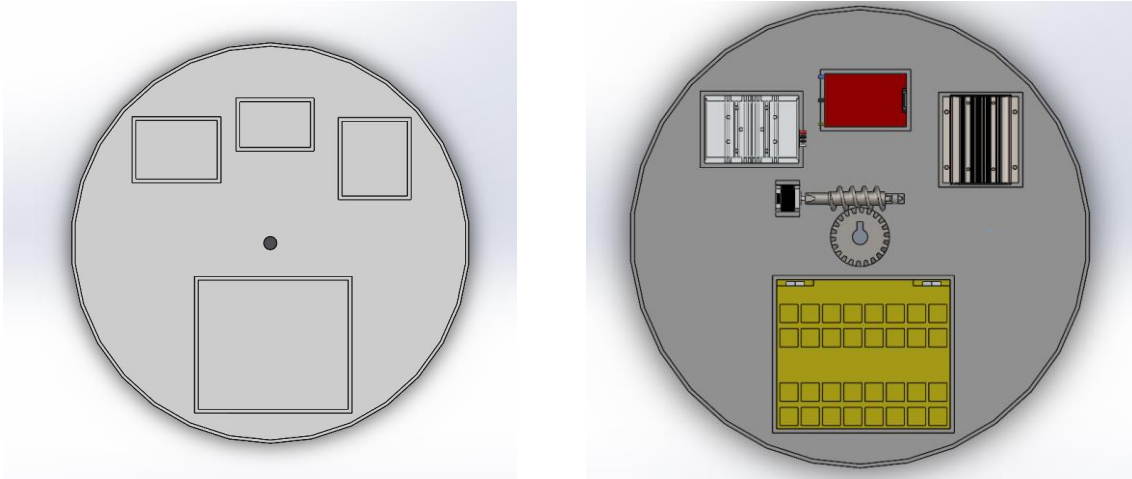


Imagen 4.2.7: Disposición de los elementos esenciales.

El último paso de diseño de la Alternativa 2 es diseñar una tapa protectora, igual que se ha hecho para la primera alternativa. Para ello, se ha intentado diseñar una tapa ligera de fibra de vidrio de 10 mm de grosor para que pueda soportar el sistema de iluminación y sensores. Ésta además contiene dos agarres de aluminio para ser levantada por facilidad por cualquier operario. Finalmente, la tapa de protección se fija a la baliza mediante cuatro tornillos colocados simétricamente.

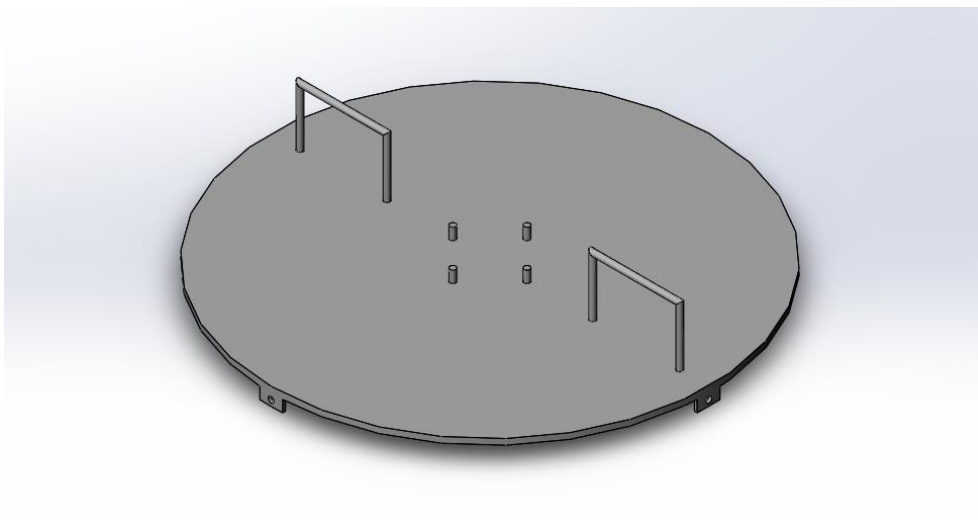


Imagen 4.2.8: Tapa de protección para la baliza circular.

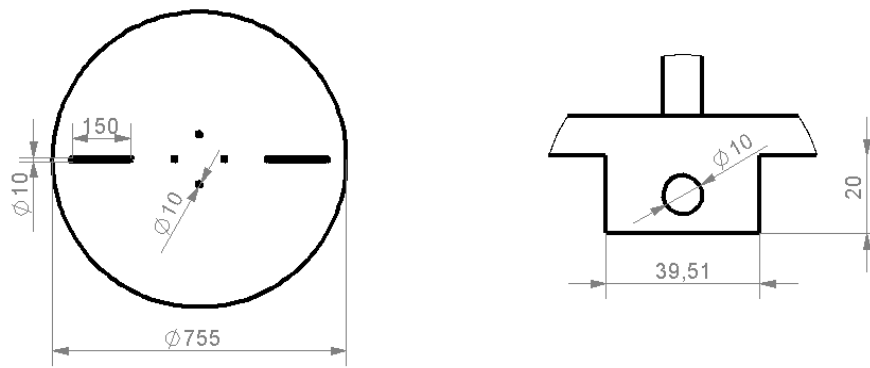


Imagen 4.2.9: Medidas de la tapa de protección.

Finalmente, el ensamblaje final de la segunda alternativa se muestra a continuación.

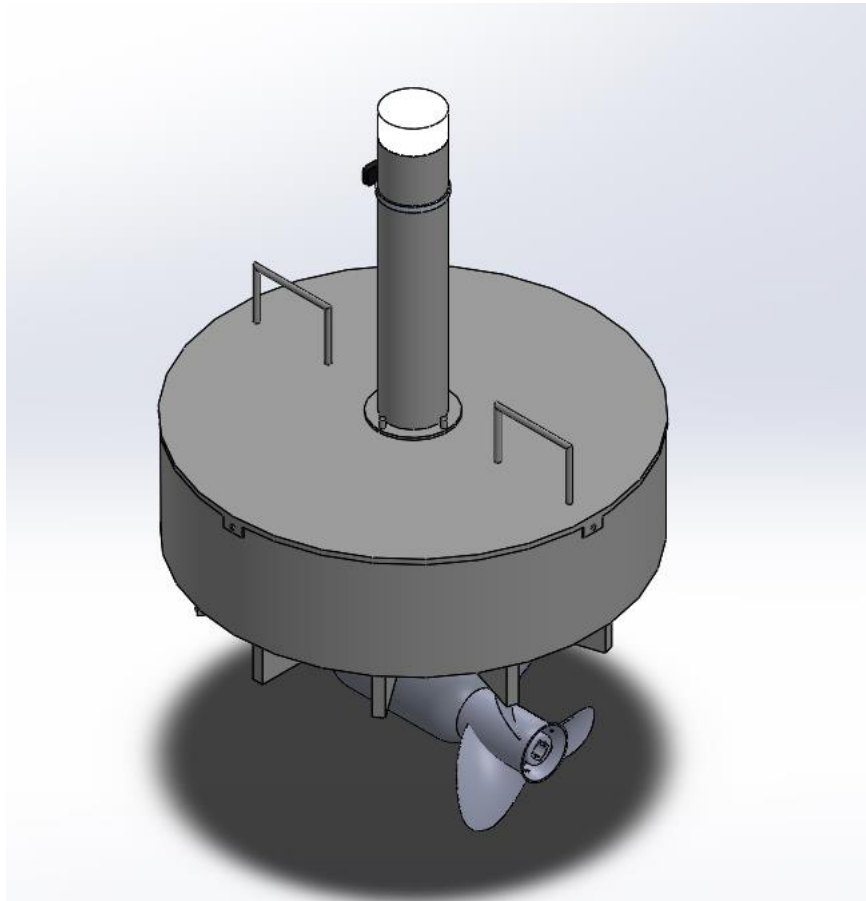


Imagen 4.2.10: Ensamblaje final de la baliza para la Alternativa 2.

Propiedades:

- Masa del casco: 26,24 kg
- Masa de la tapa de protección: 11,38 kg
- Masa total del ensamblaje: 78,6 kg⁷

Además, mediante el uso del programa asistido antes mencionado, podemos comprobar que el centro de masas queda altamente centrado como se deseaba.

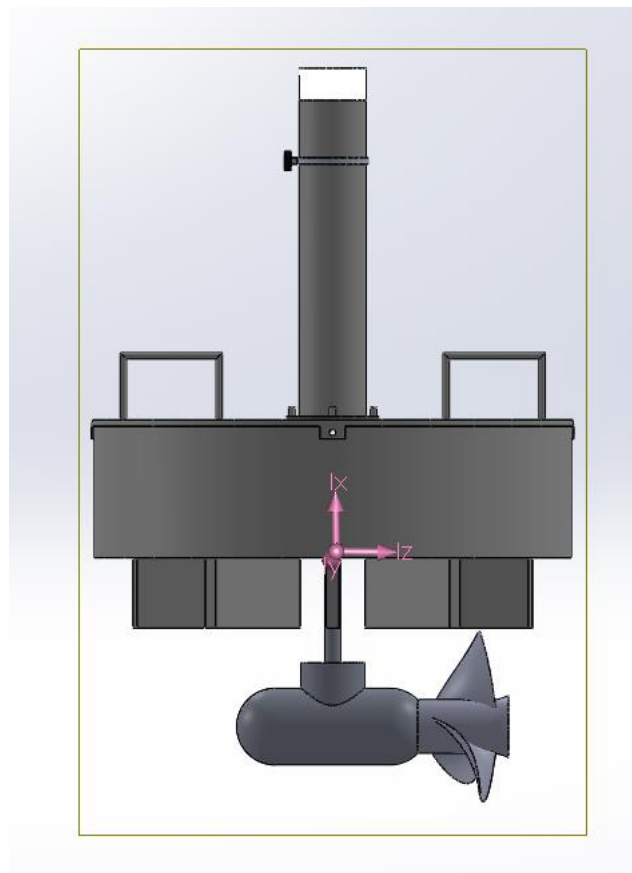


Imagen 4.2.11: Comprobación de la posición centrada del centro de masas.

Los momentos de inercia en el centro de masas son:

- I_x : 5,041 kg·m² (vertical)
- I_y : 3,867 kg·m² (longitudinal)
- I_z : 4,668 kg·m² (transversal)

⁷ Aproximación mediante Solid Works 2018

4.3. Diseño detallado del conexionado

La conexión de todos los complementos al Arduino consiste en unos *shields* adicionales. La función es actuar como complementos que amplíen las capacidades de la placa Arduino Base. Se debe tener en cuenta de no ocupar los mismos pines al realizar todo el conexionado y los requerimientos de alimentación eléctrica de cada *shield*.

En primer lugar, comentaremos la sencilla conexión entre el Motor Shield y la placa base. Para realizar la instalación debe introducirse los pines del Motor Shield a la placa base de forma que se monte uno encima del otro. Pueden alimentarse ambos desde la misma fuente, aunque en caso de necesitar un voltaje elevado (9V) para el motor, es recomendable separar las líneas de alimentación del *shield* y del Arduino, esto es posible cortando el pin que conecta la entrada “Vin Connect” de ambos, situado en la parte trasera del *shield*.

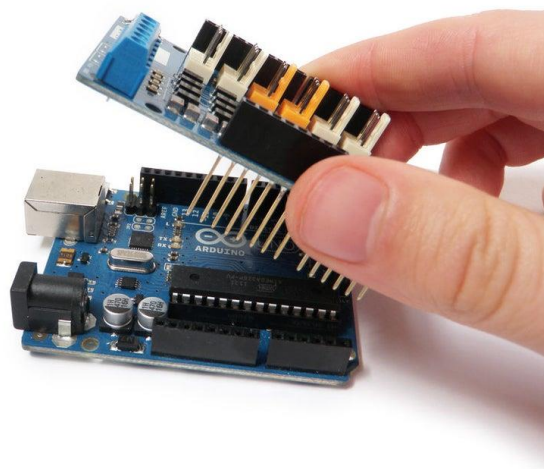


Imagen 4.3.1: Procedimiento de instalación Motor Shield

El *shield* consta de dos canales para dos motores, A y B. Requiere de alimentación externa como se ha comentado anteriormente y es capaz de proporcionar 12V y 4A como máximo a un motor, en el caso de dos motores la intensidad se reduce a la mitad (2A).

Se debe programar de forma inicial la polaridad del motor mediante las instrucciones HIGH y LOW para los pines que marcan entrada y salida del motor. Es también necesario

programar un PWM para marcar la velocidad que se desee en cada momento (cálculo del giro según el ángulo).



Imagen 4.3.2: Conexión del Motor Shield al ordenador para el programado

Para realizar el conexionado con el motor *stepper*, es necesario conocer que éste funciona con diversas bobinas. Se conecta una bobina con una cierta polaridad y luego la otra. Mediante variaciones en la polaridad de las bobinas (código en Arduino), conseguimos que el *stepper* rote en un sentido u otro.

Conociendo cada uno de los elementos que forman parte de nuestro circuito, el objetivo es realizar el conexionado de todos ellos para entender el funcionamiento de éste. Primeramente, se presenta un esquema genérico dónde se puede observar los diferentes componentes y con que otros elementos van conectados. Posteriormente, se detalla cada una de estas conexiones de forma clara y precisa para si se hiciera un prototipo.

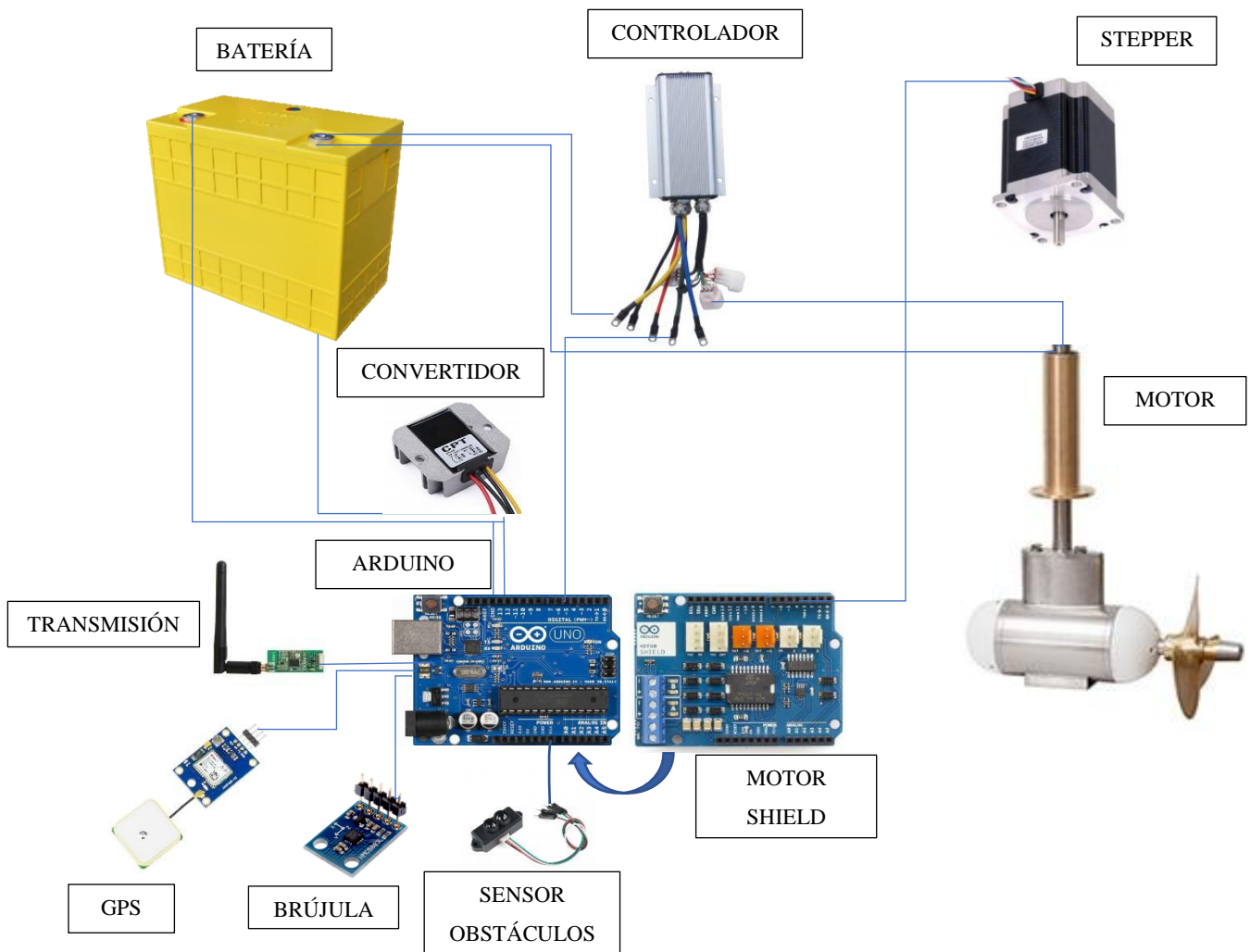


Imagen 4.3.3: Esquema genérico del conexionado.

Se tiene ahora presente todas las conexiones que deben realizarse, procedemos a especificar cada una de ellas de forma detallada.

1) Batería + Reductor

El voltaje proporcionado por la batería es superior al voltaje necesario por el Arduino para trabajar. Es por esto que, mediante un reductor, se consigue el voltaje idóneo para la placa y los respectivos componentes.

El conexionado entre ambos es sencillo, basta con alimentar el reductor y éste se encarga de disminuir la tensión para su posterior uso. El positivo es la alimentación y el negativo tierra.

2) Batería + Controlador

El controlador se alimenta de la batería por el cable rojo (9) y el negativo corresponde al cable negro (1) que va a tierra.

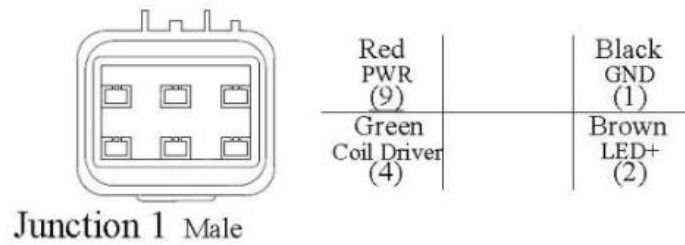


Imagen 4.3.4: Esquema cable de unión macho del controlador.

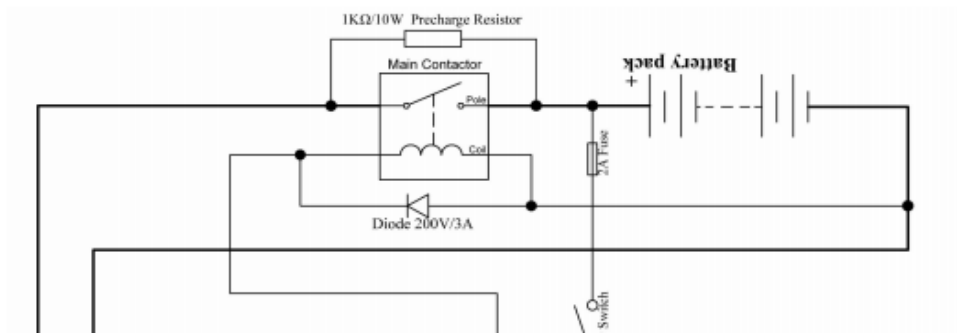


Imagen 4.3.5: Conexión batería-controlador con *Main Contactor* de seguridad.

3) Controlador + Motor

El controlador alimenta el acelerador proporcionando una regulación del voltaje mediante el cable naranja y mediante el cable azul alimenta el regulador. El cable blanco corresponde a un micro interruptor que por defecto corresponde al interruptor del acelerador.

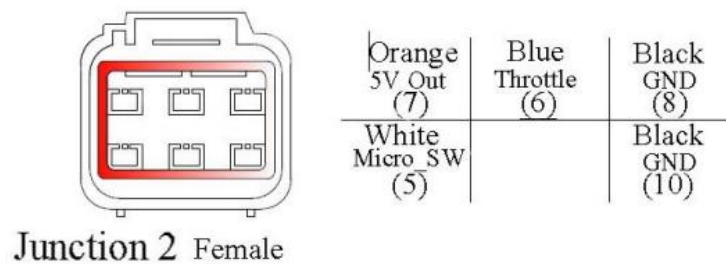


Imagen 4.3.6: Esquema cable de unión hembra del controlador.

En el esquema del controlador proporcionado por su guía de usuario, la conexión que debería realizarse es la siguiente:

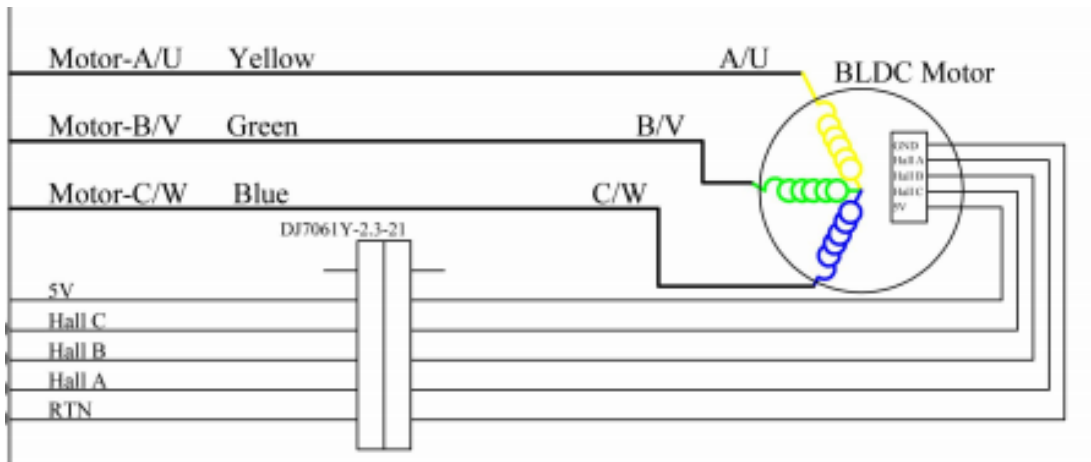


Imagen 4.3.7: Esquema conexionado controlador-motor donde podemos ver los diferentes cables que permiten el perfecto control del motor.

4) Batería + Motor

El motor se alimenta de 16 V proporcionado por la batería, la conexión entre ambos es sencilla y basta con conectar la alimentación al motor.

5) Reductor + Arduino UNO

El Arduino Uno se alimenta de 5 V obtenidos a partir del reductor ya que si lo alimentáramos directamente desde la batería sobrecalentaríamos el sistema y podría no funcionar. Al apilarse el Motor Shield encima de la placa base, alimentaremos el Arduino mediante el *shield*, es decir, el reductor alimentará el *shield* y éste será el encargado de alimentar el Arduino Uno por la ranura que se indica a continuación.

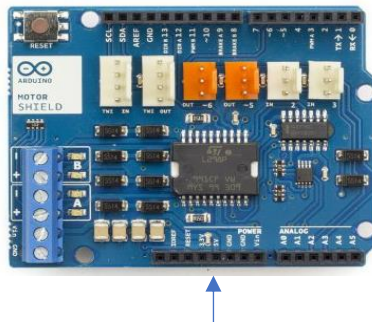


Imagen 4.3.8: Motor Shield con indicación de ranura 5V.

6) Arduino UNO + Motor Shield

La conexión entre la placa base y el *shield* es sencilla, tal y como se comenta con anterioridad al presentar el *shield*, basta con apilar sobre la placa base el Motor Shield.



Imagen 4.3.9: Motor Shield apilado a la placa Arduino UNO.

7) Arduino UNO + Sistema Transmisión

La antena debe conectarse a las cinco ranuras especificadas a continuación. Al encontrarse apilado el Motor Shield encima del Arduino, la conexión se realizará a las ranuras del Motor Shield.

La ranura VCC corresponde a la alimentación de la antena, GND tierra, RXD corresponde al envío de señal y TXD al recibimiento de señal. La conexión de estas ranuras la vemos a continuación.

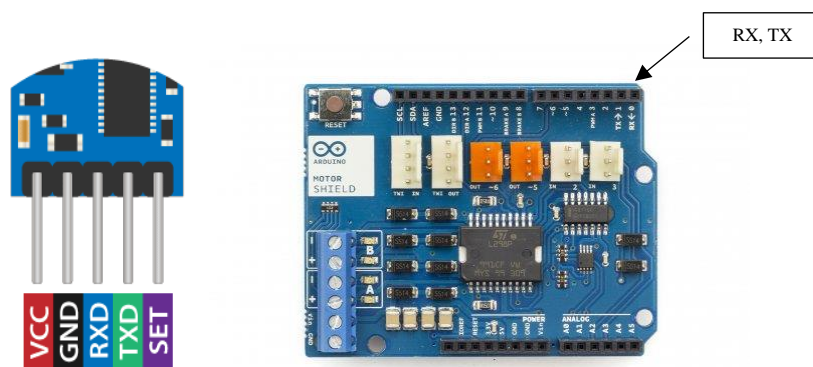


Imagen 4.3.10: Instalación sistema transmisión con indicación de ranuras.

8) Arduino UNO + Brújula

La conexión con la brújula requiere de alimentación (cable rojo y negro) y adicionalmente dos ranuras analógicas para leer su información. Las ranuras analógicas pueden ser cualquiera y como en otros conexionados, deberá realizarse la conexión con el Motor Shield apilado encima de la placa base Arduino Uno.

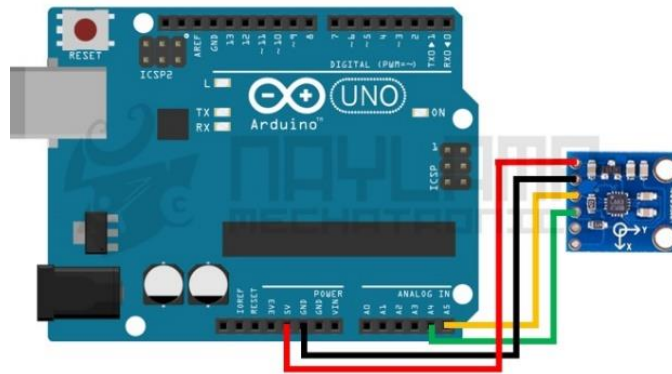


Imagen 4.3.11: Instalación de la brújula con indicación de ranuras.

9) Arduino UNO + Sensor de Obstáculos

El sensor de obstáculos requiere alimentación (cable rojo y negro) y dos cables adicionales para leer su información. Como sucede en otras conexiones, la conexión se realiza con el Motor Shield apilado encima del Arduino Uno.

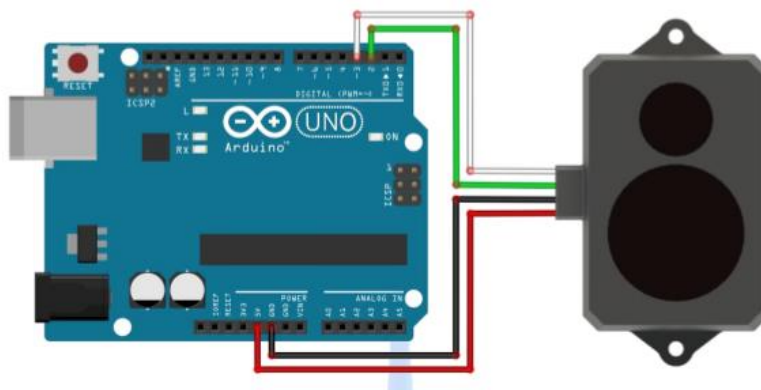


Imagen 4.3.12: Instalación del sensor de obstáculos con indicación de ranuras.

10) Arduino UNO + GPS

Las conexiones necesarias para el correcto funcionamiento del GPS son los cuatro siguientes cables que podremos ver a continuación.

- Pin 3,3 V del Arduino UNO al pin Vcc del módulo GPS
- Pin GND del Arduino UNO al pin GND del módulo GPS
- Pin digital 4 del Arduino UNO al pin Tx del módulo GPS
- Pin digital 3 del Arduino UNO al pin Rx del módulo GPS

Debe conocerse que como en otros conexionados, esta conexión se realizará con el Motor Shield apilado encima de la placa base.

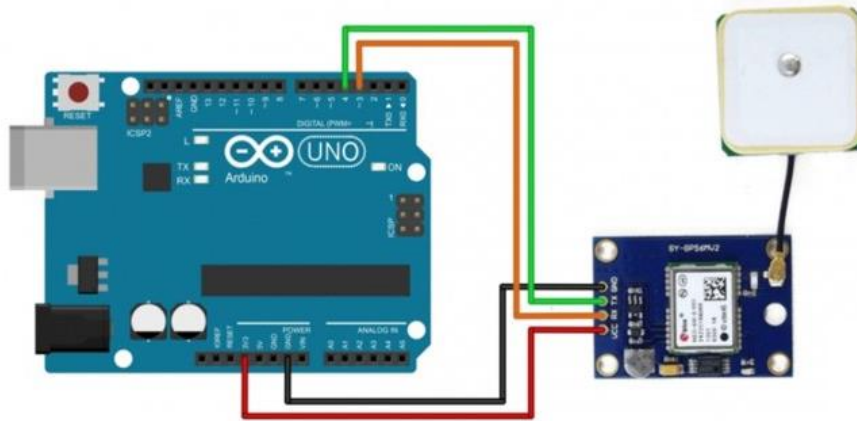


Imagen 4.3.13: Instalación del GPS con indicación de ranuras.

11) Motor Shield + Stepper

El *stepper* funciona con diversas bobinas, conectamos una bobina con una cierta polaridad y luego conectas la otra bobina. Mediante variaciones en la polaridad de las bobinas (código en Arduino) conseguimos que el *stepper* rote en un sentido u otro.

Las 4 ranuras de la izquierda son el positivo y negativo que permiten jugar con la polaridad de las dos bobinas. Las 2 ranuras de la derecha sirven para alimentar el motor a 5 V como el Arduino.

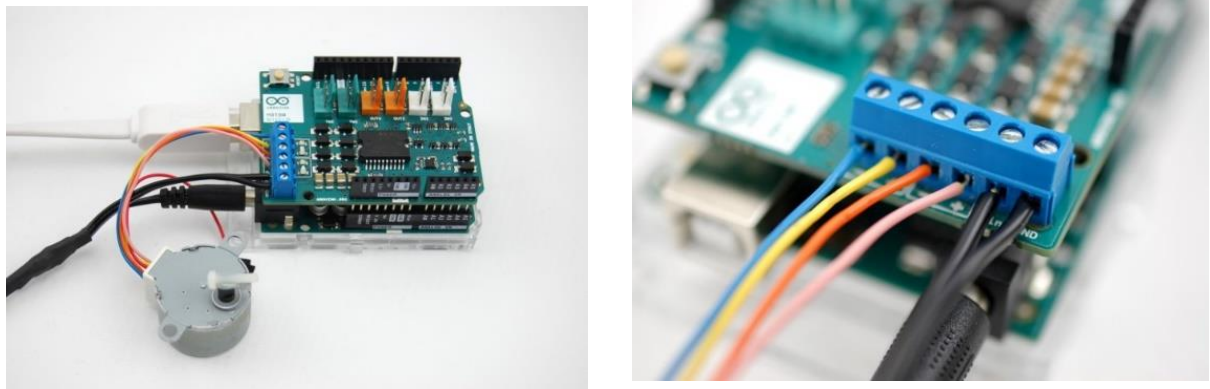


Imagen 4.3.14: Instalación del stepper con indicación de ranuras.

12) Arduino UNO + Controlador

La placa base y el controlador deberían conectarse de la siguiente forma, mediante las ranuras de 5 V, la del acelerador a un pin digital y se requeriría un pin digital adicional para realizar un frenado de emergencia si fuera necesario.

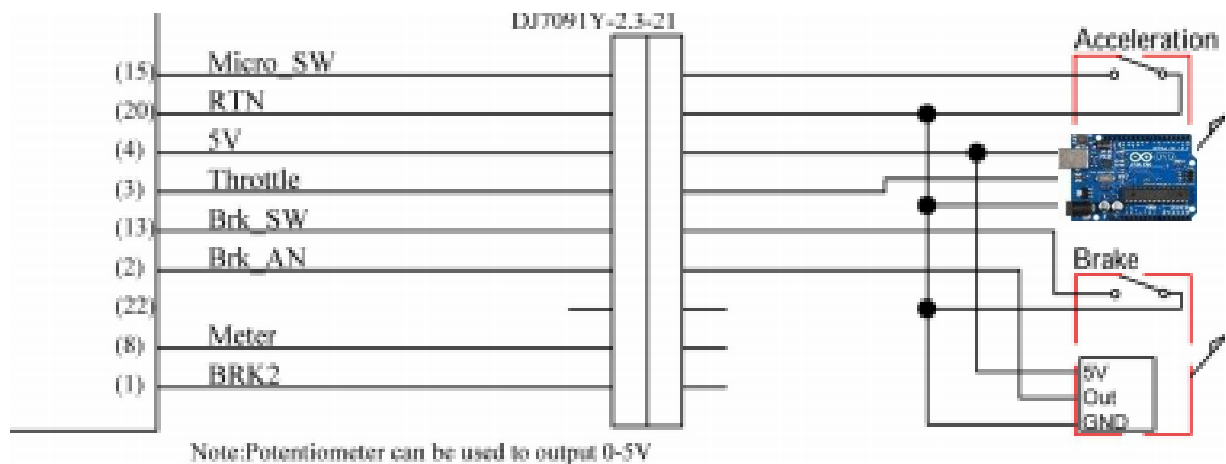


Imagen 4.3.15: Instalación del controlador con la placa base.

5. Simulación de funcionamiento y diseño del PID

El objetivo que persigue este apartado es entender como desarrolla la baliza una trayectoria mediante una simulación. Se distinguirán dos simulaciones distintas, una para cada una de las alternativas anteriormente planteadas.

5.1. Simulación Alternativa 1

Es necesario conocer unas propiedades del barco que nos permiten realizar todos los cálculos posteriores. Estas propiedades son:

- Masa: 78,6 kg
- Superficie sumergida en X: 0,05 m²
- CX (coeficiente de resistencia en x): 0,5
- Superficie sumergida en Y: 0,05 m²
- CY (coeficiente de resistencia en y): 1,28

Para esta simulación se usarán velocidades y posiciones de referencia en los ejes x, y. Estas vendrán marcadas por la trayectoria a seguir según el desplazamiento y tarea que deba hacer el barco. Se irán comparando con las velocidades y posiciones reales x, y para ser capaces de ir modificando el rumbo y detectar el error que vamos cometiendo a lo largo de una trayectoria. Todos estos cálculos se realizan mediante Excel de Microsoft, se trata de un software que permite la realizar la simulación en una hoja de cálculo y así poder entender el funcionamiento del vehículo.

Otras propiedades que se tienen en cuenta en esta simulación son:

- Incremento de tiempo: 0,01 s
- Aceleración y deceleración del vehículo: 0,257 m/s²
- Velocidad máxima: 2 m/s
- Velocidad del agua: 0,2 m/s
- Dirección del agua: 180 grados (pi rad)
- Densidad del agua: 1025 kg/m³

Con todas estas propiedades y variables, el objetivo es conocer la fuerza que debe aplicar el servo y el ángulo que debe girar éste.

Para poder controlar la estabilidad y el correcto funcionamiento del vehículo se debe desarrollar un controlador PID (controlador Proporcional Integrador Derivativo). Se trata de un mecanismo de control capaz de regular velocidad y posición entre otras variables. El controlador diseñado será el encargado de calcular la diferencia entre variables reales y deseadas que hemos comentado anteriormente.

El control se implementará sobre las variables ya comentadas como son la posición y la velocidad y actúe para proporcionar la fuerza y giro necesario a nuestro motor y *stepper* respectivamente.

En este procedimiento se deben ajustar los parámetros kd, kp y ki. Se trata de los módulos proporcional, integral y derivativo.

En primer lugar, el módulo proporcional mide un primer error tanto de posición como de velocidad. Posteriormente, el módulo integrador se encarga de medir la suma de errores en los instantes anteriores al instante actual multiplicado por el incremento de tiempo escogido. Esta suma de errores es conocida como error integrador. Por último, el parámetro derivador calcula el pendiente de la variación de error de posición y velocidad entre el instante de tiempo anterior y el actual.

$$\text{Error} = \text{Posición Referencia} - \text{Posición Real}$$

$$\text{Error Int}_t = \text{Error Int}_{t-1} + \text{Error}_t$$

$$\text{Error Der}_t = \frac{\text{Error}_{t-1} - \text{Error}_t}{\Delta t}$$

Los cálculos de posición y velocidad reales que se van calculando provienen de las siguientes expresiones:

$$\text{Velocidad}_{real} = \text{Velocidad}_{real anterior} + \text{Aceleración}_{real anterior} * \Delta t$$

$$\text{Posición}_{real} = \text{Posición}_{real anterior} + \text{Velocidad}_{real anterior} * \Delta t$$

Para conseguir estabilizar nuestro prototipo mediante el uso del controlador, se necesita encontrar los valores de cada una de las constantes y comprobar mediante gráficos que las trayectorias descritas sean estables.

Debe tenerse en cuenta que tanto las fuerzas como velocidades no pueden superar un valor máximo establecido ya que si no podría tenderse al infinito y debemos tener en cuenta las limitaciones de velocidad y fuerza que puede proporcionar nuestro motor. Comentado esto, se expone la fórmula general para el cálculo de la Fuerza de Impulsión que deberá especificarse para x, y.

$$\text{Fuerza impulsión} = kd * (Vel_{ref} - Vel_{real}) + kp * (Pos_{ref} - Pos_{real}) + ki * Error \text{ Int}_t$$

También es necesario conocer la Fuerza de Fricción que actuará sobre el vehículo que se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Fuerza Fricción} = \frac{1}{2} * \rho * Superficie * Cx * (Vel_{real} - Vel_{agua})^2$$

Como el motor no es capaz de aplicar fuerzas en 2 direcciones distintas, se calculará una fuerza de impulso total y un ángulo de giro que deberá realizar.

$$\text{Fuerza Impulso Total} = \sqrt{F_{imp\ x}^2 + F_{imp\ y}^2}$$

$$\alpha = \text{arctg}\left(\frac{F_y}{F_x}\right)$$

Se debe tener en cuenta adicionalmente que la Fuerza de Impulso Total no debe superar la fuerza de impulso máxima.

Se define una trayectoria deseada con posiciones de referencia dadas y procedemos a conocer el comportamiento de nuestro vehículo.

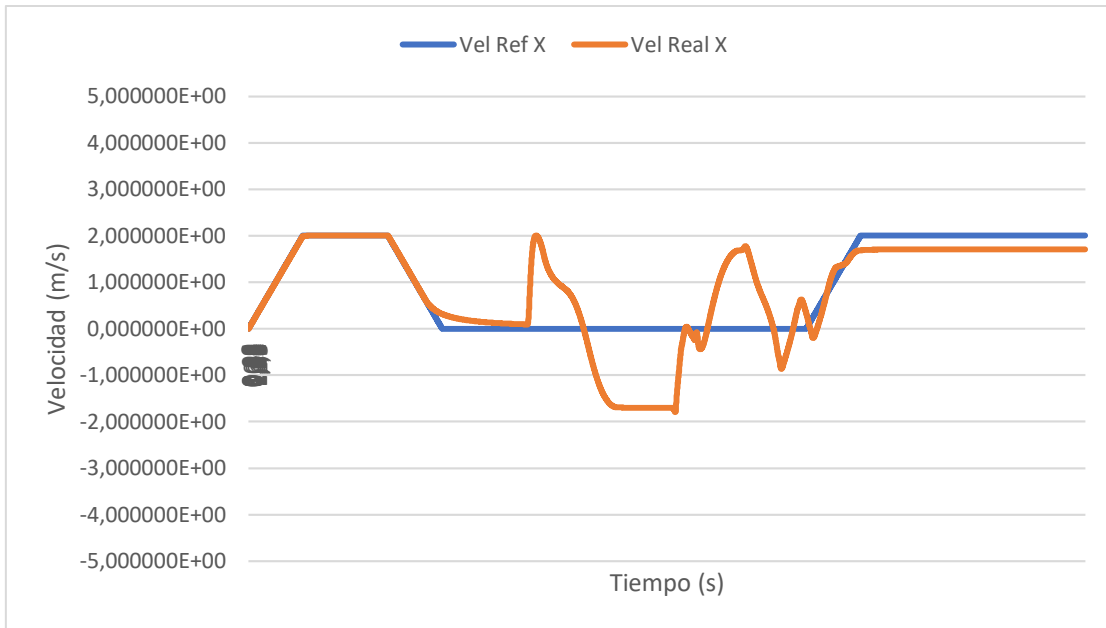


Gráfico 5.1.1: Velocidad de referencia y real respecto al tiempo. Eje X

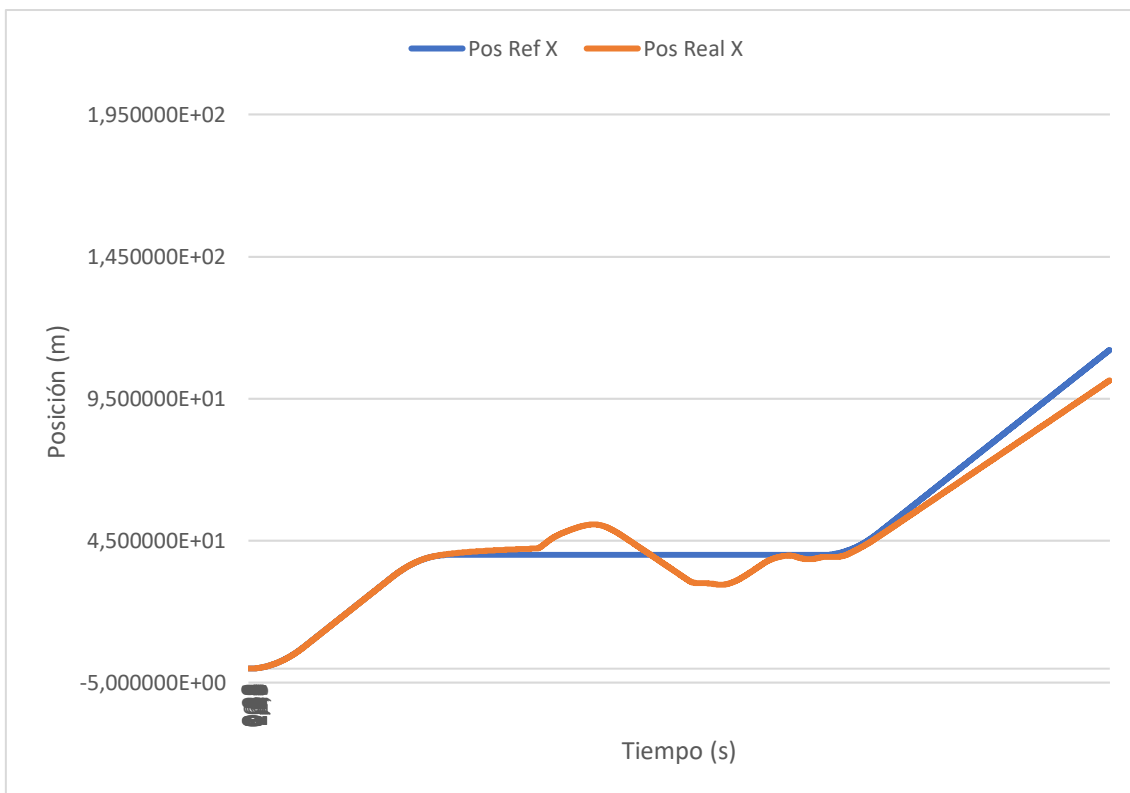


Gráfico 5.1.2: Posición de referencia y real respecto al tiempo. Eje X

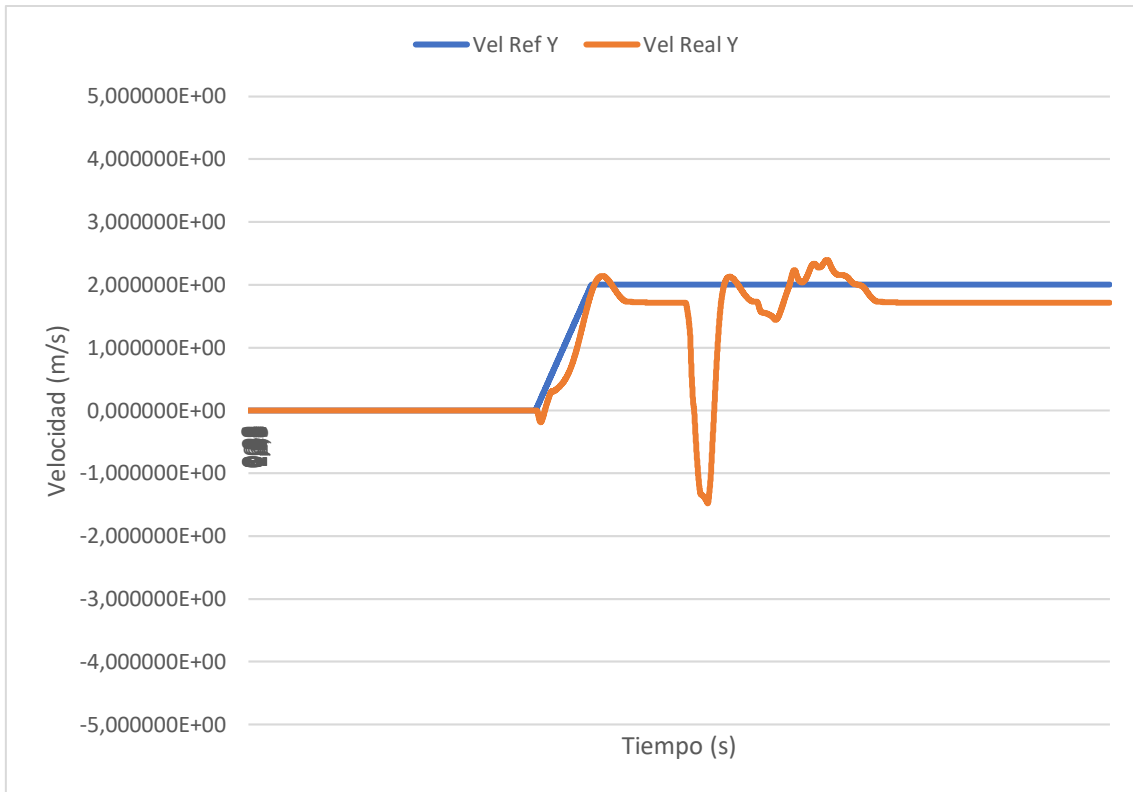


Gráfico 5.1.3: Velocidad de referencia y real respecto el tiempo. Eje Y

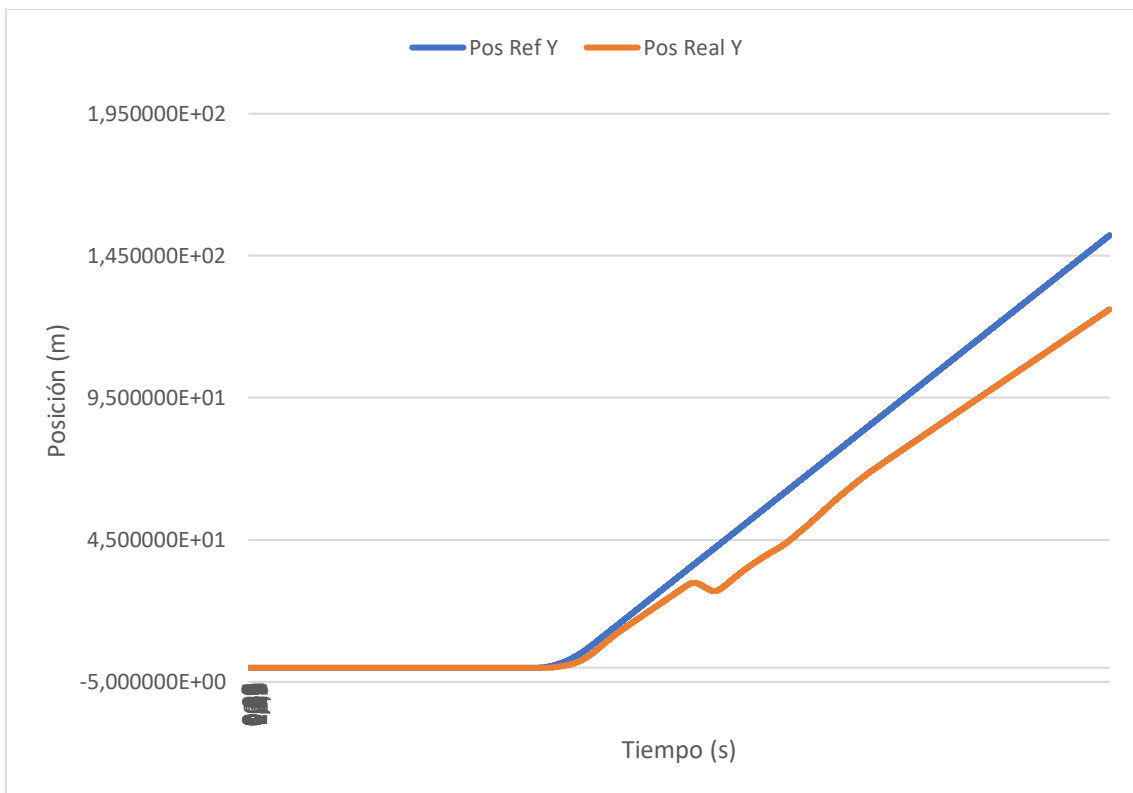


Gráfico 5.1.4: Posición de referencia y real respecto el tiempo. Eje Y

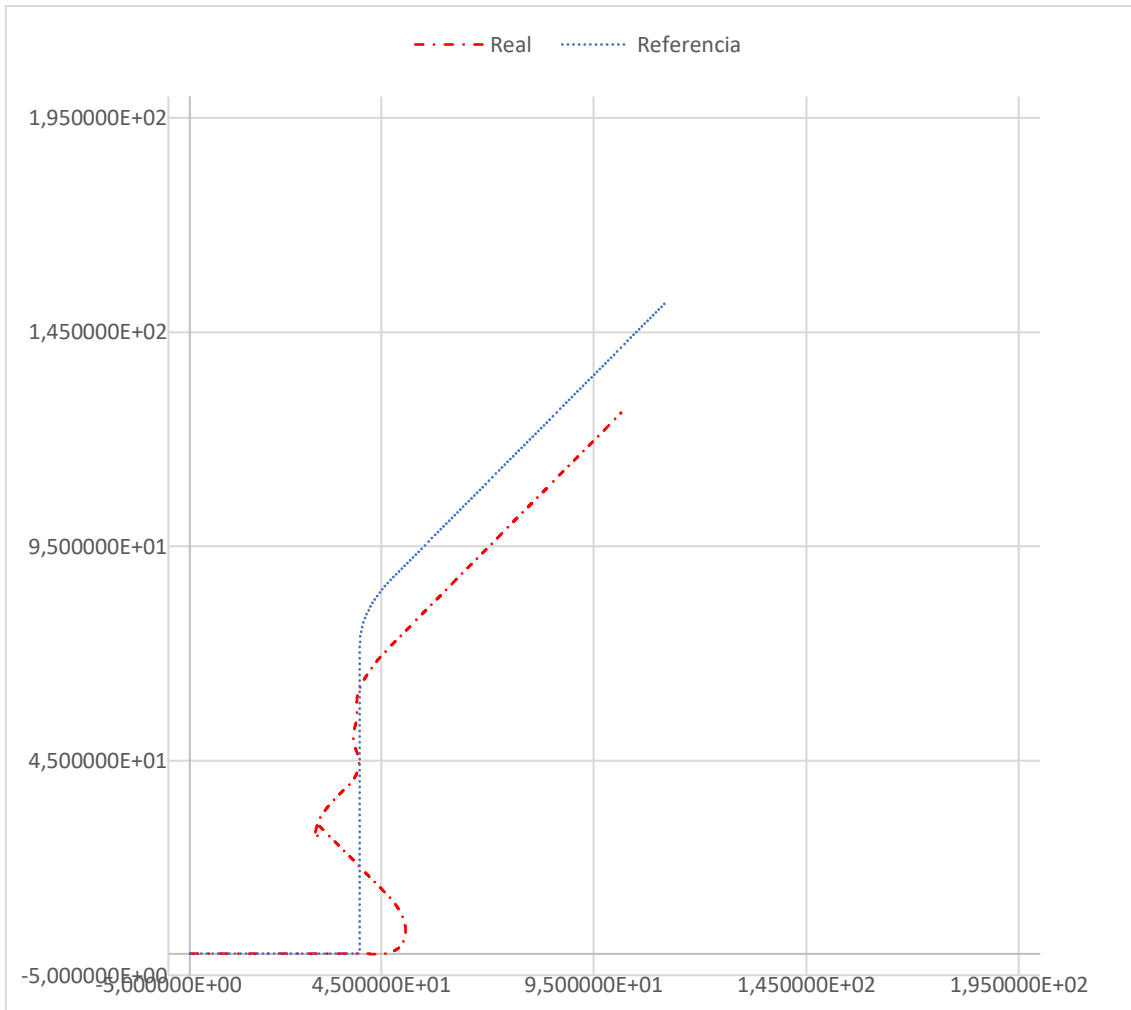


Gráfico 5.1.5: Trayectoria de referencia y real

Como se puede apreciar en los diferentes gráficos anteriores, es complicado seguir correctamente la trayectoria definida ya que se van corrigiendo los errores que aparecen en posición y velocidad. La forma de la baliza para esta alternativa no permite realizar giros cerrados de forma ágil y el giro debe ser progresivo, lo que comporta la obtención de la trayectoria del gráfico.

Los valores de las constantes del controlador que permiten lograr esta trayectoria son las siguientes:

- $K_p = 250$
- $K_i = 0,1$
- $K_d = 35$

5.2. Simulación Alternativa 2

La simulación de esta alternativa tiene un funcionamiento similar a la otra. Eso sí, debemos tener en cuenta que cambian algunas constantes.

- Masa: 78,6 kg
- Superficie sumergida en X: 0,048 m²
- CX (coeficiente de resistencia en x): 1,28
- Superficie sumergida en Y: 0,048 m²
- CY (coeficiente de resistencia en y): 1,28

Conociendo estas variaciones en las propiedades y manteniendo el resto de las constantes y ecuaciones, se aplica la misma metodología anterior para el diseño de un controlador PID.

Se asigna una trayectoria a realizar determinada y a continuación observamos los resultados obtenidos.

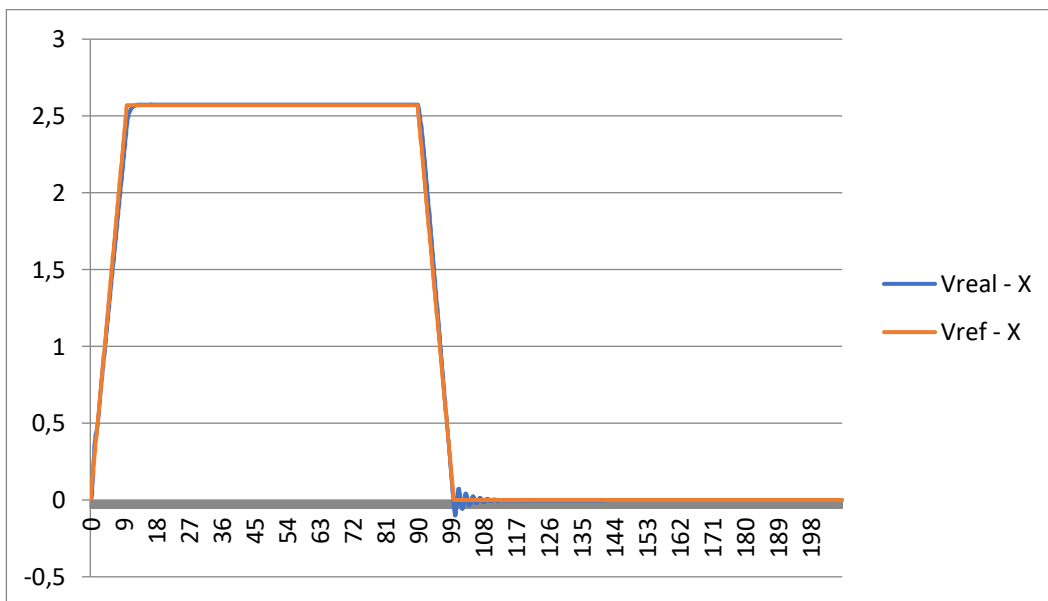


Gráfico 5.2.1: Velocidad de referencia y real respecto al tiempo. Eje X

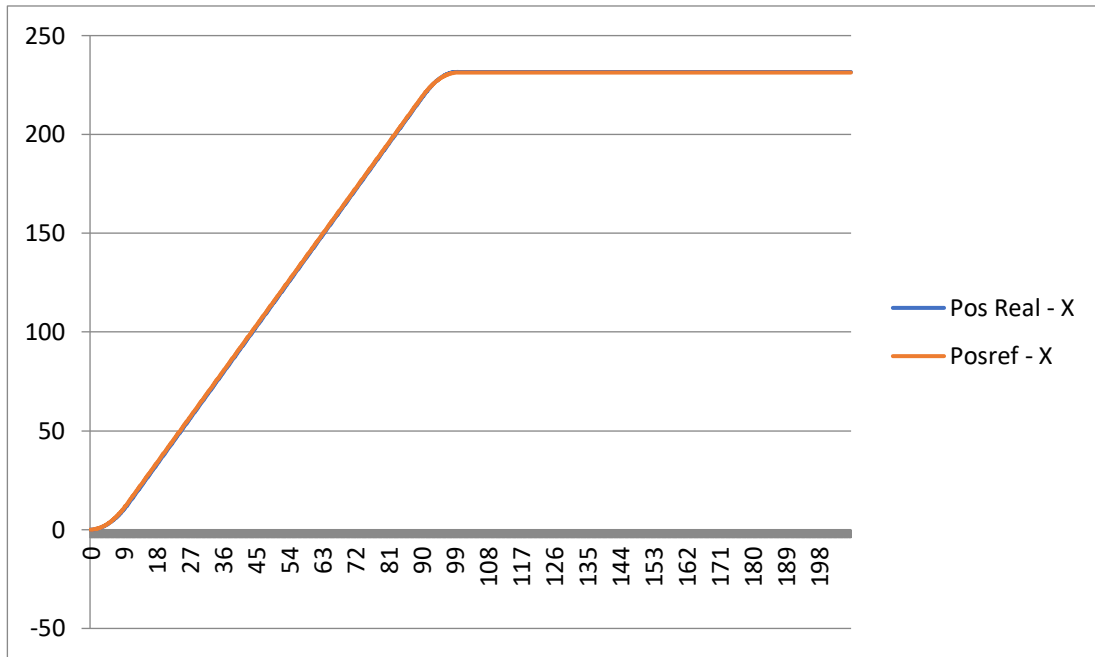


Gráfico 5.2.2: Posición de referencia y real respecto el tiempo. Eje X

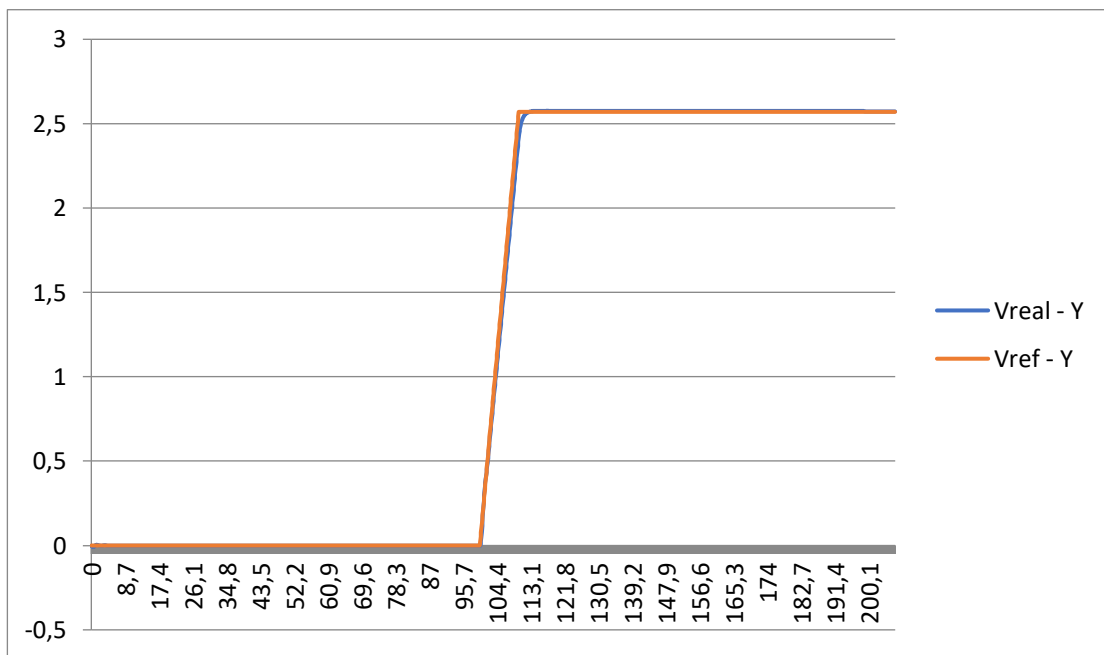


Gráfico 5.2.3: Velocidad de referencia y real respecto el tiempo. Eje Y

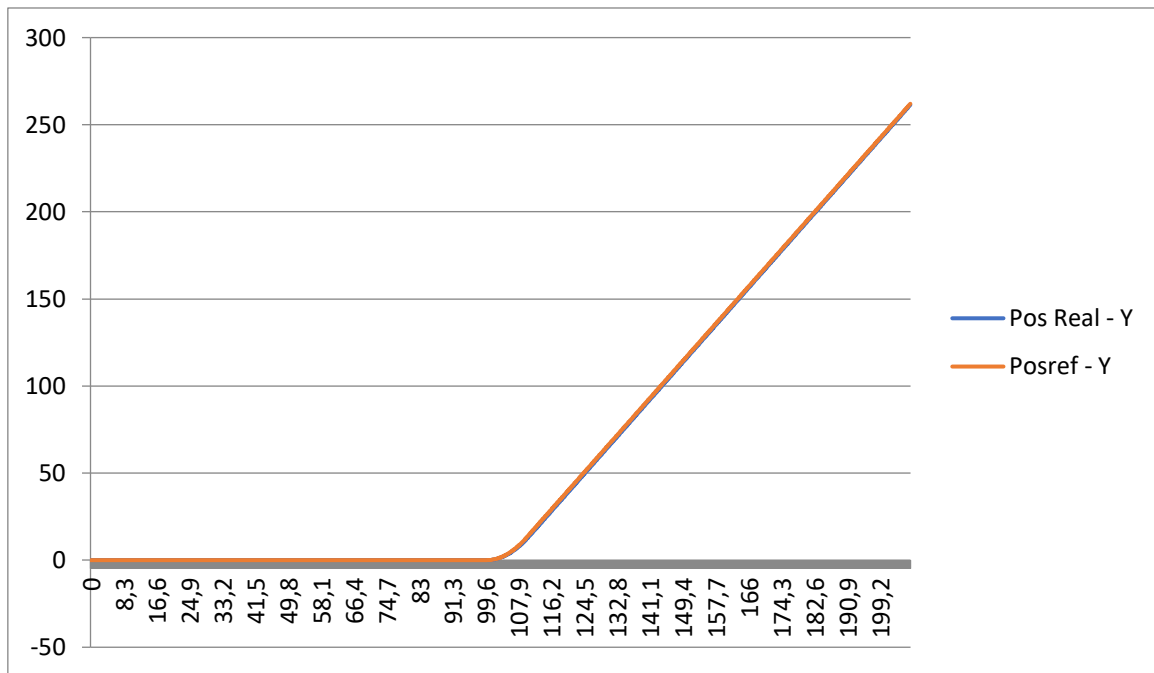


Gráfico 5.2.4: Posición de referencia y real respecto el tiempo. Eje Y

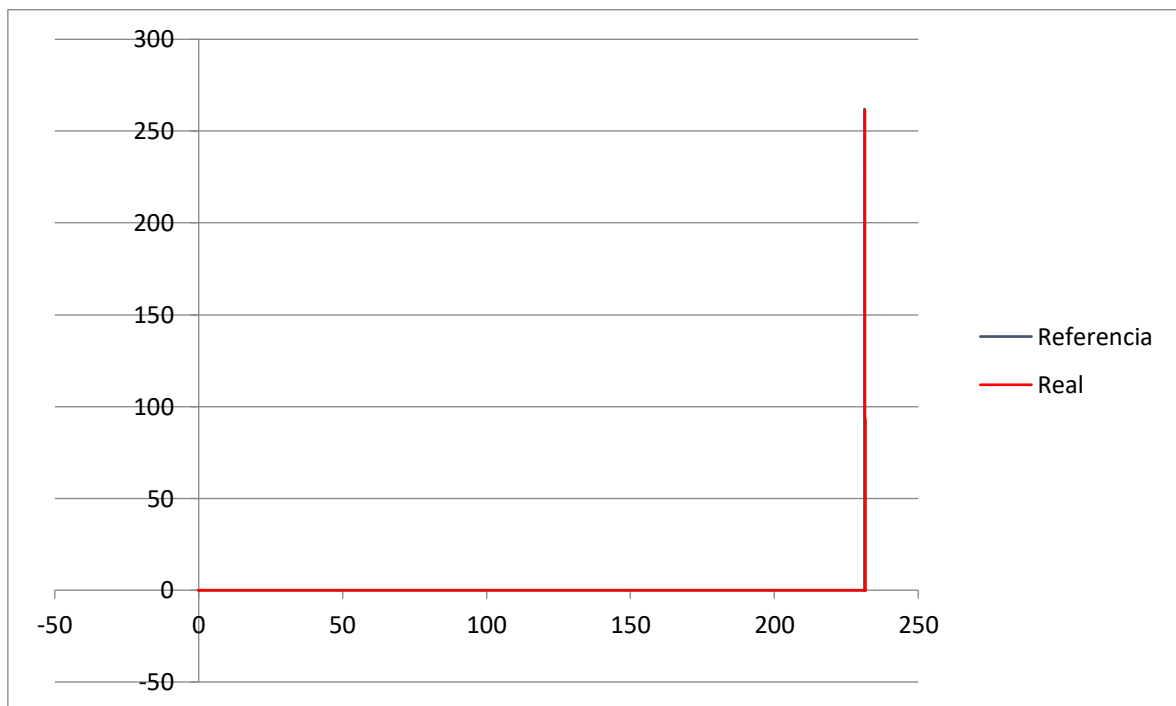


Gráfico 5.2.5: Trayectoria de referencia y real

En los anteriores gráficos de velocidad, posición y trayectoria para la Alternativa 2, apenas se aprecian diferencias entre la variable referencia y la real. Debe destacarse una pequeña oscilación que sufre la velocidad en el eje x, pero no resulta nada preocupable para el desarrollo correcto de la trayectoria.

Los valores de las constantes del controlador que permiten lograr esta trayectoria son las siguientes:

- $K_p = 200$
- $K_i = 0,12$
- $K_d = 40$

6. Comparativa entre alternativas y decisión

Llegados a este punto se plantea decidir cuál de las dos opciones es mejor opción para nuestro proyecto y en consecuencia descartar la otra.

A priori, la Alternativa 1 y la Alternativa 2 no difieren en cuanto a tecnología, ya que las dos se han equipado con los mismos elementos: mismo motor Piktronik de 1kW, misma batería de 90Ah, mismo controlador Kelly, ... claramente su diferencia está en la base del concepto, en la forma que debería adoptar una baliza para el fin que se le ha dado en este proyecto; recordemos que es el de guiado de embarcaciones desde su entrada a puerto hasta el pantalán y amarre que se la ha asignado.

En resumen, la forma o el casco de la Alternativa 1 ha sido influenciada por la idea que se tiene hoy en día de cualquier embarcación, es decir, partiendo de una proa puntiaguda hasta una popa plana con un casco arqueado. Si bien es cierto que se le han hecho modificaciones posteriores (como la adición de una quilla inferior), su forma y manera de funcionar y maniobrar no se alejaría de la de una embarcación de recreo. Sin avanzar ningún acontecimiento, esta última frase va a tener más repercusión de la que se cree en la decisión entre ambas alternativas.

Por otro lado, el casco o la forma genérica de la Alternativa 2 ha sido pensada desde cero sin influencias, es decir, si se piensa en un artefacto que tenga que ser maniobrable con gran precisión y ágil, la forma más lógica en la que pensar es la circular. Este hecho recae en su simetría, realmente en un casco de forma circular nunca *vas de cara*. Realmente nunca se va de cara ni de lado ni hacia atrás, y esto simplifica mucho la maniobrabilidad. Si la baliza desea ir a hacia una dirección concreta, simplemente se debe girar el motor los grados deseados e ir hacia adelante.

Una vez resumidas las dos alternativas, se procede a discutir cuál es mejor que la otra. Como se ha comentado, el coste entre ambas sería similar, pues equipan la misma tecnología y similares materiales. Por lo tanto, se procede a evaluar sus funciones. Las funciones de estas embarcaciones, dado su objetivo dentro de puertos deportivos, se centran en tener la mejor maniobrabilidad posible ya que van a desempeñar sus funciones

en lugares relativamente estrechos y rodeados de embarcaciones que la multiplican en tamaño.

La maniobrabilidad de la Alternativa 1 se asemeja mucho a una embarcación de recreo, y como se ha comentado anteriormente, esto es un factor en su contra. Cuando la baliza llega a un determinado punto con una trayectoria y una velocidad y, porqué por ejemplo desea girar por un pantalán, ha de realizar un giro brusco, no lo puede hacer poniendo el motor a 90 grados. Este movimiento es físicamente imposible ya que generaría un momento que volcaría la embarcación. El giro debe ser progresivo siguiendo una curva, hasta que la proa vuelve a quedar encarada al punto de destino. Si extrapolamos este ejemplo a la electrónica de la baliza autónoma, ésta recibe coordenadas que debe ir siguiendo. Cuando una coordenada recibida implica un giro, la baliza empieza a girar, pero al notar un error muy grande de dirección gira más. Al girar en exceso, intentaría corregir la trayectoria, por lo que empezaría a zigzaguear alrededor de la nueva trayectoria; todo esto podría conllevar a sistemas marginalmente estables difíciles de corregir bajo la mínima experiencia de los autores de este proyecto. Además, el diseño del servo para esta alternativa es mucho más complejo.

La diferencia en la Alternativa 2 reside en que, para ir a una dirección, esta no debe tener una proa y una popa encaradas en esa dirección para que la embarcación navegue bien. Un casco de forma circular permite que con simplemente girar el motor los grados necesarios a la trayectoria que se desea seguir, se vaya directo al destino sin necesidad de maniobras por parte del sistema autónomo de control de intentar alinearse a la trayectoria.

Las descripciones de como serían las trayectorias se han podido comprobar en el punto anterior mediante la simulación, donde se ha visto claramente que usando la Alternativa 2 la trayectoria de la baliza sería notablemente correcta mientras que la Alternativa 1 va realizando correcciones constantemente de velocidad y posición.

Es por eso por lo que se ha decidido que la **Alternativa 2** es mejor que la Alternativa 1.

7. Planificación

Este proyecto inicia a principios de febrero de 2019 con el inicio del segundo cuatrimestre del año académico. En el Gantt que se presenta a continuación se puede ver de forma detallada cada una de las fases realizadas a lo largo de este proyecto y también su duración. Esta herramienta permite ver que fases se han trabajado de forma conjunta paralelamente a lo largo de las semanas.

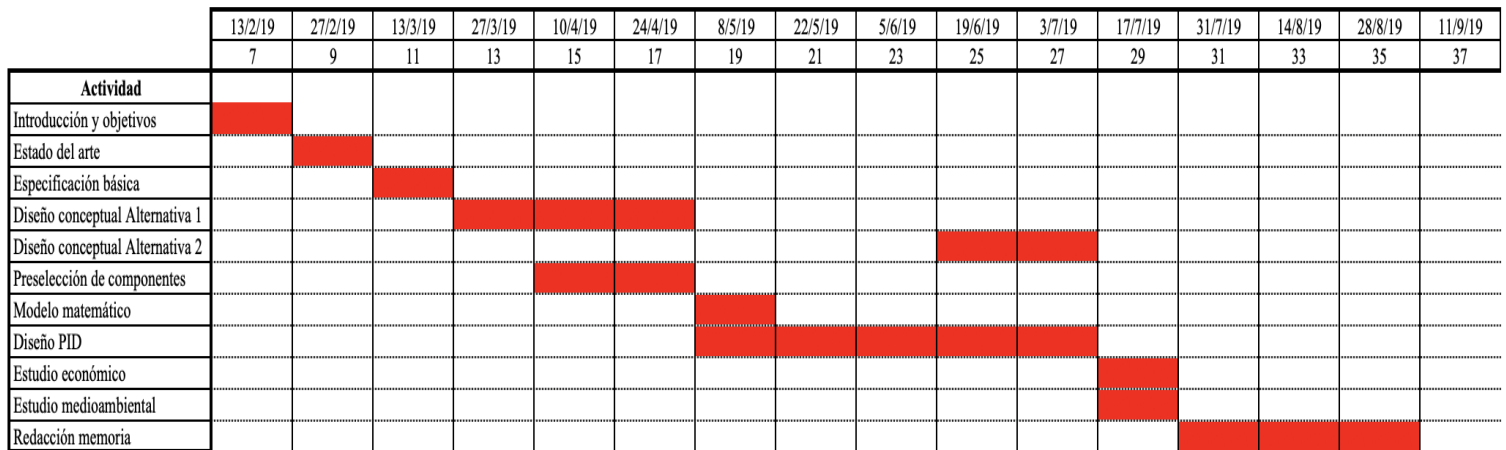


Diagrama 7.1: Diagrama de Gantt del proyecto

8. Estudio económico

En este apartado se tiene en cuenta solamente las horas dedicadas al estudio y los diferentes costes de licencias de software utilizado. Como en este proyecto únicamente se ha hecho el estudio y no el prototipaje, quedan excluidos del presupuesto todos los componentes físicos que se necesitarían para la construcción. A continuación, se especifica el presupuesto considerando que son dos los ingenieros que lo han realizado.

ACTIVIDAD	PRECIO POR HORA (€/h)	HORAS INGENIERILES DEDICADAS	COSTE ACTIVIDAD (€)
Estudio de precedentes	80	80	6400
Estudio y selección de componentes	80	140	11200
Simulación mediante Excel	100	130	13000
Diseño del prototipo mediante SolidWorks	35	160	5600
Redacción de la memoria	20	90	1800
Licencia Office pack 2019	-	-	70
Licencia SolidWorks 2018 student version	-	-	0
COSTE TOTAL DEL PROYECTO	-	-	38070

Tabla 8.1: Desglose de costes según actividad y horas dedicadas.

Analizando el desglose anterior, el coste total es de 38070 € con un total de horas dedicadas de 300 h por cada estudiante, es decir, 600 h en la totalidad del proyecto.

9. Impacto medioambiental

A lo largo de este proyecto se ha diseñado la baliza y simulado alguna posible trayectoria, por lo que el impacto medioambiental es bajo al no desarrollar ningún prototipo.

Desde otro punto de vista, el sistema trabajado tiene un impacto medioambiental menor si se compara con los sistemas que realizan la misma función actualmente por los conceptos detallados a continuación. Es decir, si nuestra baliza sustituyera una *zodiak* convencional que realizara la misma tarea, sería mucho más sostenible.

Si se procediera a fabricar el prototipo, nuestro diseño tendría un impacto medioambiental mínimo. En primer lugar, el material usado para la construcción del casco del prototipo (aluminio y acero) es fácilmente reciclable por lo que no se contamina el medio ambiente.

En relación con el motor se debe considerar un impacto medioambiental bajo, el uso de energía eléctrica mediante la batería favorece este aspecto. En caso de reciclado del motor podría reciclarse gran parte de sus materiales, aunque algún conexionado sería más complicado.

Cada uno de los componentes electrónicos y sus respectivos circuitos integrados afectan de forma notable al impacto medioambiental. Todos los circuitos electrónicos deberían seguir la directiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) que aseguran un menor impacto, aunque no lo anulan del todo. El seguimiento de esta directiva y el uso de plásticos reciclables serían unas buenas prácticas para el cuidado del medio ambiente.

En relación a la batería de litio, destaca la importancia de reciclarlas para reducir sus impactos medioambientales y de salud. Los mayores impactos son los relacionados con la producción, el procesamiento y el uso de compuestos de metales de cobalto y níquel. Nunca debería depositarse la batería en el medioambiente debido al proceso de descomposición que puede sufrir pudiendo liberar metales como el litio, el cual es muy tóxico para el medioambiente.

10. Conclusiones

Con la finalización de este proyecto, se puede concluir que se han logrado los objetivos planteados inicialmente. Se han buscado y analizado todas las tecnologías presentes en el mercado y se ha conseguido diseñar un concepto, a partir de dos alternativas, con unas buenas prestaciones que si se desarrollara lograría con éxito gran parte de las funciones que debe cumplir.

Respecto a las especificaciones técnicas iniciales, se han cumplido todas ellas respecto a velocidad máxima, eslora máxima, manga máxima, autonomía y distancia mínima de transmisión. Otras especificaciones relacionadas con la embarcación también se han logrado, así como los diferentes movimientos que debe realizar y su estabilidad. La obtención de un radio de giro pequeño para aumentar la maniobrabilidad es un logro importante y también la capacidad de marcha atrás. Aunque técnicamente no existe la marcha atrás, con girar 180 grados el motor es suficiente para realizarla. Al desarrollar esta capacidad de giro con la alternativa final seleccionada se obtiene una embarcación con capacidad de realizar cualquier giro e ir en cualquier dirección, es decir, giro posible de 360°.

Es importante destacar la obtención de una fuente de energía eléctrica para ser más sostenible para el medio ambiente, de esta forma se evitan residuos de gasolina y aceites. Consecuentemente se reduce el posible impacto ambiental que se pudiera generar.

Respecto a las especificaciones en señalización, comunicación y posicionamiento no podemos obtener conclusiones detalladas debido a que no se ha desarrollado el prototipo y no se han podido comprobar el funcionamiento de estos ámbitos.

En cuanto a su simulación, se han obtenido buenos resultados en el diseño de un PID para la segunda alternativa de casco circular, hecho que finalmente ha decidido que ésta fuera la escogida para crear un prototipo en el futuro. Esta simulación ha sido clave para entender el funcionamiento de la baliza y el modelo matemático que hay detrás.

Además, y no menos importante, se cree que realmente con una financiación se podría llegar a seguir con la investigación, desarrollo y diseño para la creación de un prototipo que se pudiera experimentar en puertos deportivos. Por lo tanto, este es un proyecto que realmente podría dar lugar a un negocio en el futuro.

Finalmente, este proyecto ha proporcionado un conocimiento amplio en muchos aspectos que anteriormente no conocíamos y ha involucrado de lleno con el funcionamiento automático de los vehículos que está cogiendo mucha importancia actualmente. Es cierto que se han aprendido muchos nuevos conceptos, pero también se han aplicado diferentes conocimientos adquiridos a lo largo de los 4 años del grado, como puede ser el diseño en SolidWorks, así como la simulación en Excel, conocimientos de electrónica o conocimientos de control automático. La facilidad para diseñar un controlador PID básico ha sorprendido positivamente a los autores del proyecto, ya que se pueden lograr buenos resultados en poco tiempo. Se quiere destacar, por último, que se ha aprendido diferentes nociones en elaboración de prototipos que se espera que sean útiles próximamente en el mundo laboral.

11. Siguietes pasos y futuras mejoras

En este apartado se reflejan cuáles serían los siguientes pasos y mejoras que pueden implementarse en el diseño de este proyecto:

- Confirmar las hipótesis de flotabilidad para los cascos mediante software avanzado (tipo *Fluent/Ansys*).
- Ampliar el estudio de las fricciones aerodinámicas con el agua.
- Ampliar el estudio de las fricciones del motor con el casco para un mejor dimensionamiento del sistema de dirección.
- Optimización de las formas de los cascos propuestos.
- Ampliar el diseño a uno detallado para la futura creación del prototipo.
- Elaboración de un estudio de equilibrio en situaciones de pequeñas olas.
- Programación mediante código de la electrónica.
- Elaboración de un prototipo a escala para comprobar que la electrónica es la adecuada y cumple sus funciones.
- Experimentación en diversas situaciones en un laboratorio especializado en fluidos y aerodinámica.

Se espera poder realizar las mejoras en un proyecto futuro como el Trabajo Final de Máster.

12. Agradecimientos

Se quiere agradecer a todas las personas que han colaborado de forma directa o indirecta en la realización de este proyecto ya sea por el apoyo proporcionado como por la facilitación de información y conocimiento.

Mencionar especialmente a nuestro tutor, el doctor Emilio Angulo Navarro, para agradecerle su dirección, ayuda constante y orientación dada a lo largo de estos últimos meses.

Por último, dar las gracias a la Universitat Politècnica de Catalunya por la facilitación de licencias de estudiante gratuitas para algún programa empleado.

13. Bibliografía

- [1] <https://www.tudelft.nl/en/3me/research/check-out-our-science/autonomous-boats/>
- [2] <https://www.bairdmaritime.com/work-boat-world/specialised-fields/6352-robert-allan-ltd-launches-autonomous-firefighting-boat-series>
- [3] <https://www.dnvgl.com/technology-innovation/revolt/index.html>
- [4] <http://www.piktronik.com/index.php/en-products-motors>
- [5] http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lp12v90ah?category_id=176
- [6] www.grabcad.com
- [7] https://www.digikey.es/product-detail/es/trinamic-motion-control-gmbh/QSH4218-41-10-035/1460-1075-ND/4843426?utm_adgroup=Stepper+Motors&mkwid=s&pcrid=315758575331&pkw=&pmt=&pdv=c&productid=4843426&slid=&gclid=CjwKCAjwnrjrBRAMEiwAXsCc47IIP0enI6UUOoQe5RCERbq1oXMXqEpvPkjGJpS9Zh5H6l326Np7pRoCXcwQAvD_BwE
- [8] https://www.youtube.com/watch?v=j_xVQ1opiUc
- [9] <https://www.youtube.com/watch?v=fXYw5PLu290>
- [10] <https://www.youtube.com/watch?v=ZUB3CzRHrBk>
- [11] <https://www.asvglobal.com/case-studies/>
- [12] <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1588/0900766b81588adf.pdf>
- [13] <https://www.youtube.com/watch?v=VhbFbxyOI1k>
- [14] <https://www.dfrobot.com/product-1702.html>
- [15] http://www.jrc.co.jp/eng/product/lineup/jlr7500_7800/specs.html
- [16] <http://www.navico-commercial.com/en-US/Products/Discontinued-Products/GPS/Simrad-MX525A-DGPS-Sensor-en-us.aspx>
- [17] https://www.robotshop.com/es/es/kit-here-rtk-gnss.html?gclid=CjwKCAjw1KLkBRBZEiwARzyE7-WwznAvif5N67m227d428DR5DihYk77YFBchbETV9UZ2xXRJB5VXxoCrSAQAavD_BwE
- [18] <https://www.robotshop.com/es/es/ttl-3dr-radio-telemetry-915-mhz-kit.html>

- [19] https://www.industrialshields.com/es_ES/shop/product/is-mduino-54ara-m-duino-plc-arduino-ethernet-54ara-e-s-analogicas-digitales-plus-688?category=1&gclid=CjwKCAjw1KLkBRBZEiwARzyE78fchbcTE5GpOntkAaiiUiZy3IIRAZvObKDze2ItC-BXsO-VHle2TRoCpkQQA vD_BwE
- [20] https://en.four-faith.com/f8110d-lora-module.html?gclid=CjwKCAjw1KLkBRBZEiwARzyE7zsnxrvlTH1_hY2NrCWtR96zIG2EZHVgkxHpRTLE68bRSw7UZ4QD_BoCu-QQA vD_BwE
- [21] <https://www.torqueedo.com/es>
- [22] <http://greenstarmarine.se/en/produkter/e-line/>
- [23] https://minnkotamotors.johnsonoutdoors.com/electric-outboard-motors/electric-outboard?_ga=2.93227294.268282132.1552070808-1558348274.1552070808
- [24] http://www.aquawatt.at/GB/elektro_aussenbordmotoren_14_GB.html
- [25] <http://www.ba-tec.de>
- [26] <https://www.torqueedo.com/es/productos/fuerabordas/deep-blue/deep-blue-50-t/M-3205-00.html>
- [27] <https://www.kellycontrollers.eu/magic-controller-100a-24-48v-programozhato>
- [28] <https://www.luisllamas.es/arduino-puerto-serie/>
- [29] <https://store.arduino.cc/arduino-ethernet-shield-2>
- [30] <https://www.dunkermotoren.com/en/products/gearboxes/detail/8884203289/>
- [31] <https://www.amazon.com/Right-Angle-Dunkermotoren-Gearhead-GR63X55/dp/B00K7Q099E>
- [32] https://es.rs-online.com/web/p/products/8293525/?grossPrice=Y&cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_ES_ES_Automatizaci%C3%B3n_Y_Control_De_Procesos-_-Motores_El%C3%A9ctricos_And_Controladores_De_Motor_Y_Perif%C3%A9ricos%7CMotores_Paso_A_Paso-_-PRODUCT_GROUP&matchtype=&pla-447559865721&gclid=CjwKCAjw0N3nBRBvEiwAHMwvNobgJ_pKW_1p35QOE9N-6p8Pm5R4s4NBHppjbp3-ZKYEeAh0L22VdhoCqhEQAvD_BwE&gclsrc=aw.ds
- [33] <https://assets.omega.com/pdf/motion-control/motor-controls/speed-controllers/OMDC-MD.pdf>
- [34] <http://www.directindustry.com/prod/acs-motion-control/product-9170-696965.html>

