

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un dron acuático no tripulado para monitoreo y mapeado de cuerpos acuáticos en
camaroneras

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros en Mecatrónica

Presentado por:

Carlos Andrés Villacís Blum

Gustavo Alfonso Alvarado Peñafiel

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

A mis abuelos Néstor Villacís, Teresa Cárdenas, Bolívar Blum y Alicia Baquedano, que son la base de las familias que me han formado y criado para llegar a ser la persona capaz de haber desarrollado este trabajo y toda la carrera universitaria que estoy por concluir.

Carlos Villacís

Dedicatoria

A mi señora madre. A toda la gente con la he cruzado camino de una manera que se guardado en mi memoria, pues son muchas y me han ayudado a estar ahora mismo aquí. A mí, 10 años en el pasado, quien realmente dudaba de su futuro, igual que mi ser actual mantiene estas dudas más reconoce el valor más importante de todos, la vida. A la vida, porque nadie la conoce y, aun así, merece ser explorada.

Gustavo Alvarado

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, por todas las oportunidades y bendiciones que me ha dado. A mis padres, porque han sido fundamentales para recibir estas gracias.

A mis hermanos, porque siempre me han impulsado a mejorar como ser humano. A mis tíos, porque han sido vitales para mi formación y constante evolución como persona.

A mis amigos y profesores, por acompañarme en esta etapa académica, y haber aportado tanto en este episodio de mi vida.

A mi novia, por haberme acompañado en este último tramo de mi carrera, con su apoyo y su aliento.

Carlos Villacís

Agradecimientos

Muchas gracias, Cruz Narcisa, por todas las cosas que me has dado y por todas aquellas que aun faltan. No sé cuál es la convención sobre el trato incondicional entre madre e hijo, pero estoy agradecido de manera que jamás podre asemejar a lo que has hecho por mí.

Me gustaría agradecer la apertura de la Escuela Politécnica del Litoral en su sistema de admisión interno, puesto que fue este quien me ayudo a decidirme por la carrera que estoy orgulloso de haber cursado.

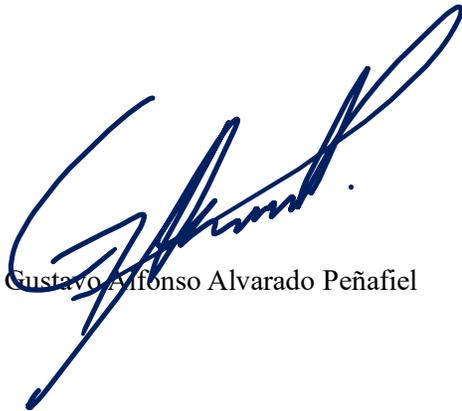
Gracias Guillermo, Matthew, Michael, Joyce y tantos otros compañeros y amigos que han acompañado este trayecto de mi historia. Su amistad y ayuda ha sido increíble, espero que sigan siendo grandes personas.

Por último, quiero agradecer a la empresa que me ha acogido, especialmente a mi mentor y jefe, Carlos Zúñiga, quien ha sido un referente para mi carrera profesional desde sus inicios.

Gustavo Alvarado

Declaración expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Gustavo Alfonso Alvarado Peñafiel y Carlos Andrés Villacís Blum damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



Gustavo Alfonso Alvarado Peñafiel



Carlos Andrés Villacís Blum

Evaluadores

Efraín Terán, M.Sc.

Profesor de la materia

Bryan Puruncajas, M.Sc.

Profesor tutor

Resumen

La industria camaronera es uno de los sectores productores más relevantes del país en la actualidad, sin embargo, se ha identificado que, tanto temperaturas elevadas como bajo oxígeno disuelto en piscinas de engorde, pueden destruir un 20% de la producción de una hacienda. A partir de esto, se ha propuesto diseñar un sistema de navegación remota para el monitoreo de las piscinas de camarones. Durante visitas a las piscinas camaroneras se ha identificado que la navegación remota es problemática, pues las grandes extensiones de las piscinas dificultan la visualización de diversos obstáculos en la superficie. Esto representa un grave riesgo de pérdida de inversión en los sistemas de monitoreo.

Para solventar estos inconvenientes, se ha integrado al sistema sensores tipo Lidar y sonar para la identificar obstáculos y medir el fondo marítimo respectivamente, información que es transmitida con muy baja latencia a un ordenador en tierra. De esta manera, se resguarda la inversión realizada en los equipos de monitoreo al evitar choques o encallamientos, al poseer un sistema de visualización remota para observar la trayectoria y detectar los obstáculos.

El dron se ha diseñado para un rango de operación de hasta 2 km, con una velocidad de 1.5 m/s. Con estas características se estima realizar mediciones, las cuales indicarán parámetros a optimizarse para aumentar la producción. En conclusión, se ha logrado un dron ligero y compacto con facilidad de operación, manejo y traslado; cuyo diseño modular permite la adaptación a sistemas existentes para aumentar la factibilidad de la implementación del producto.

Palabras clave: Ecolocalización, topografía, camarones, monitoreo, navegación remota.

Abstract

The shrimp industry is one of the most relevant production sectors in the country today, however, it has been identified that both high temperatures and low dissolved oxygen in fattening ponds can destroy 20% of a farm's production. It has been proposed to design a remote navigation system for monitoring shrimp ponds. During its development, it has been identified that the ponds are as large as 24 acres, which complicates their navigation. In addition, many obstacles can be found on the surface. This represents a serious risk of loss of investment in monitoring systems.

To overcome these drawbacks, Lidar and sonar sensors have been integrated into the system to identify obstacles and measure the seabed respectively, data that are transmitted with very low latency to a computer on land. Thus, the investment made in the monitoring equipment is protected by avoiding collisions or strandings, by having a remote visualization system to observe the trajectory and detect obstacles.

The drone has been designed for an operating range a bit longer than a mile, with 3 knot average speed. Therewith it is estimated that measurements will be taken, which will indicate parameters to optimize and increase production. In conclusion, we have achieved a light and compact drone with ease of operation, handling, and transportation; whose modular design allows adaptation to existing systems to increase the feasibility of product implementation.

Key words: *Echolocation, topography, shrimp, monitoring, remote navigation.*

Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VII
Simbología.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XII
Índice de planos.....	XIII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.1.1 Descripción del problema.....	4
1.2 Justificación del problema.....	5
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Marco teórico.....	8
1.4.1 Tipos de embarcaciones usados para control a distancia.....	8
1.4.1.1 Lancha a motor.....	8
1.4.1.2 Aerodeslizador.....	9
1.4.1.3 Catamarán.....	9

1.4.2	Propulsión en una embarcación	10
1.4.2.1	Timón-Hélice	10
1.4.2.2	Hélice con empuje vectorial	11
1.4.2.3	Skid Steering.....	11
1.4.3	Dificultades en la parametrización de las piscinas de camarón	11
1.4.3.1	Ecolocalización por sonar.....	12
1.4.4	Geolocalización.....	14
1.4.5	Temperatura de cultivo del camarón.....	15
1.4.6	Saturación de oxígeno en piscinas de camarón.....	16
1.5	Estado del arte	17
1.5.1	Vehículos no tripulados.....	17
1.5.2	Mapeado de zonas acuáticas	18
Capítulo 2	20
2.1	Metodología.....	22
2.2	Requerimientos de diseño.....	22
2.3	Selección de alternativa de solución.....	23
2.4	Diseño conceptual.....	26
2.5	Proceso de diseño	27
2.6	Parámetros de diseño eléctrico	28
2.6.1	Selección de sensor de oxígeno disuelto.....	28

2.6.2	Selección de sensor de temperatura	29
2.6.3	Diagrama esquemático de control.....	31
2.6.4	Diseño de circuito electrónico detallado.....	32
2.6.5	Conexión con el sistema de visualización.	34
2.7	Parámetros de diseño mecánico.....	36
2.7.1	Selección de propulsión para el dron.....	37
2.7.2	Cálculo y selección de alimentación eléctrica	40
2.7.3	Diseño de plataforma	42
2.7.4	Diseño de esqueleto metálico.....	43
2.7.5	Cálculo de empuje necesario para flotar.....	45
2.7.6	Diseño de cascos.....	46
2.7.7	Acople y posicionamiento de propulsores	49
2.8	Sistema de control	50
2.8.1	Selección de módulo computacional para procesar los datos.....	50
2.8.2	Sistema de lectura de datos en módulo de procesamiento.....	51
2.8.3	Análisis y visualización de mapeado y monitoreo.....	54
2.8.4	Configuración de controlador de navegación	55
2.8.4.1	Configuración inicial.....	57
2.8.4.2	Calibración de la geolocalización, IMU y compases	58
2.8.4.3	Configuración para los propulsores.....	60

2.8.4.4	Mecanismos de seguridad.....	62
Capítulo 3.....		64
3.1	Resultados y análisis.....	65
3.2	Dimensiones de la embarcación	65
3.3	Análisis de elementos finitos del esqueleto metálico	68
3.4	Estimación de velocidad máxima con simulación CFD.....	70
3.5	Simulación de mapeado y monitorización.....	73
3.6	Análisis de costos	74
Capítulo 4.....		77
4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	78
4.2	Conclusiones.....	78
4.3	Recomendaciones.....	79
Referencias.....		80
Apéndices.....		85

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i> (Vehículo de superficie no tripulado)
MAVLink	<i>Micro Air Vehicle Link</i> (Protocolo de enlace para vehículos no tripulados)
GNSS	<i>Global navigation satellite system</i> (Sistema global de navegación satelital)
CNA	Cámara Nacional de Acuacultura
IA	Inteligencia Artificial
ML	<i>Machine Learning</i> (Aprendizaje automático)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet de las cosas)
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulación por ancho de pulsos)
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidad de Medición Inercial)
APM	Software de control Ardupilot
EKF3	<i>Extended Kalman Filter algorithm</i> ver. 3
RTL	<i>Return to launch</i> (Retorno al despegue)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>

Simbología

cm	Centímetro
kg	Kilogramo
lb	Libra
mg/L	Miligramo por Litro
m/s	Metros por segundo
km/h	Kilómetros por hora
mAh	miliamperios-hora
A	Amperios
V	Voltios
rpm	Revoluciones por minuto
°C	Grados Celsius
m ³	Metros cúbicos
cm ³	Centímetros cúbicos
MHz	Megahercios
N	Newton
kg f	kilogramo fuerza

Índice de figuras

Figura 1.1 Datos proporcionados por la CNA sobre el crecimiento de la industria camaronera de Ecuador	2
Figura 1.2 Piscina de camarón con un alimentador de obstáculo	5
Figura 1.3 Equipo en piscina, rodeado de soportes para alimentación manual y aireadores	6
Figura 1.4 USV con estructura de lancha motora	8
Figura 1.5 Aerodeslizador militar LCAL (Landing Craft Air Cushion)	9
Figura 1.6 Catamarán diseñado por PlanetSolar y alimentado por paneles solares.....	10
Figura 1.7 Imagen satelital mostrando las diversas formas de las piscinas de camarón en campo	12
Figura 1.8 Sistema de medición de cama acuática por medio de sonar	13
Figura 1.9 Gráfica de porcentaje de mortalidad de una población de camarones a través de los días	15
Figura 1.10 Esquema de funcionamiento de los alimentadores controlados por sistemas IoT	17
Figura 1.11 Imagen de marketing para venta de super dron alimentador de camarones desarrollado por Duke en 2019.....	18
Figura 1.12 Resultado topográfico del proyecto de mapeado en Okinoshima, Japón	19
Figura 1.13 Vehículo acuático no tripulado utilizado para la misión de Okinoshima, Japón	20
Figura 2.1 Boceto del vehículo acuático no tripulado	26
Figura 2.2 Proceso de diseño	27
Figura 2.3 Diagrama de conexiones controladas por el módulo de navegación y procesamiento	31
Figura 2.4 Localización de puertos principales y auxiliares y señalización de cableado	33

Figura 2.5 Configuración de conexiones eléctricas para el controlador de navegación de un USV	34
Figura 2.6 Configuración de módulo de radiofrecuencia para lectura de datos	35
Figura 2.7 Pantalla de configuración del módulo de radiofrecuencia	36
Figura 2.8 Baterías tipo Li-Po seleccionadas para la embarcación	42
Figura 2.9 Plataforma de la embarcación junto con el housing	43
Figura 2.10 Estructura de soporte para la plataforma	44
Figura 2.11 Diseño de cascos de polietileno expandido reforzado por fibra de vidrio.....	46
Figura 2.12 Refuerzo interno de los cascos	47
Figura 2.13 Perfil posterior del casco con grosor de pared de 12 mm.....	48
Figura 2.14 Medidas de la base del propulsor	49
Figura 2.15 Diagrama de flujo del sistema de lectura de datos en módulo de procesamiento	53
Figura 2.16 Sistema de visualización de mapeado y monitoreo, con almacenamiento de datos..	55
Figura 2.17 Aplicación Mission Planner iniciada en pestaña Data.....	56
Figura 2.18 Selección del frame a instalar en el controlador.....	57
Figura 2.19 Renglón mostrando el cambio de un parámetro en Mission Planner	58
Figura 2.20 Vista frontal de las posiciones para la calibración del acelerómetro	59
Figura 2.21 Tipos de Giros completos a realizar en la calibración de los compases	59
Figura 2.22 Dirección de giro de propulsores para crear avance. Vista frontal	60
Figura 2.23 Configuración de los Propulsores en Skid Steering	61
Figura 2.24 Maniobras básicas de movimiento y respuesta de los propulsores a la señal PWM. 62	
Figura 3.1 Modelo 3D de la embarcación.....	66
Figura 3.2 Vista lateral izquierda de la embarcación con medidas de largo y alto	67

Figura 3.3 Vista frontal de la embarcación con medidas de ancho y distancia entre ejes 67

Figura 3.4 Resultados de deformación de la viga en análisis de elementos finitos 69

Figura 3.5 Resultados de esfuerzo normal máximo en el análisis de elementos finitos 70

Figura 3.6 Simulación CFD del casco a 2 m/s..... 71

Figura 3.7 Gráfica de fuerza suministrada por el motor 72

Figura 3.8 Interfaz de visualización de resultados..... 73

Figura 3.9 Sistema en desarrollo de visualización para profundidad. 74

Figura D.1 Simulación CFD a 0.5 m/s..... 93

Figura D.2 Simulación CFD a 1 m/s..... 93

Figura D.3 Simulación CFD a 1.5 m/s..... 94

Figura D.4 Simulación CFD a 2 m/s..... 94

Figura D.5 Empuje vs señal PWM según el fabricante 95

Figura D.6 Corriente vs señal PWM según el fabricante..... 95

Índice de tablas

Tabla 1.1 Rango de concentraciones de oxígeno y su efecto en el camarón	16
Tabla 2.1 Requerimientos para el diseño por categoría	22
Tabla 2.2 Criterios para evaluación de alternativas	24
Tabla 2.3 Matriz de decisión con la ponderación de las alternativas	25
Tabla 2.4 Comparativa entre sensores de oxígeno disuelto	29
Tabla 2.5 Comparativa entre sensores de temperatura.....	30
Tabla 2.6 Distribución de la aproximación de la masa	37
Tabla 2.7 Parámetros para el diseño.....	37
Tabla 2.8 Comparación de sistemas de propulsión.....	39
Tabla 2.9 Consumo aproximado de los principales componentes eléctricos.....	40
Tabla 2.10 Masa aproximada de los componentes de la embarcación	45
Tabla 2.11 Dimensiones de los cascos	49
Tabla 2.12 Selección de módulo de procesamiento	51
Tabla 2.13 Comportamiento del propulsor según el rango de señal PWM.....	61
Tabla 3.1 Desglose del costo del proyecto.....	75
Tabla A.1 Motor T200 de la marca Blue Robotics	86

Índice de planos

- PLANO 1 Componentes de la embarcación
- PLANO 2 Vista explosionada
- PLANO 3 Catamarán vista isométrica
- PLANO 4 Catamarán
- PLANO 5 Casco
- PLANO 6 Armadura
- PLANO 7 Agarradera
- PLANO 8 Diagrama eléctrico de módulo de navegación
- PLANO 9 Diagrama eléctrico de módulo de procesamiento

Capítulo 1

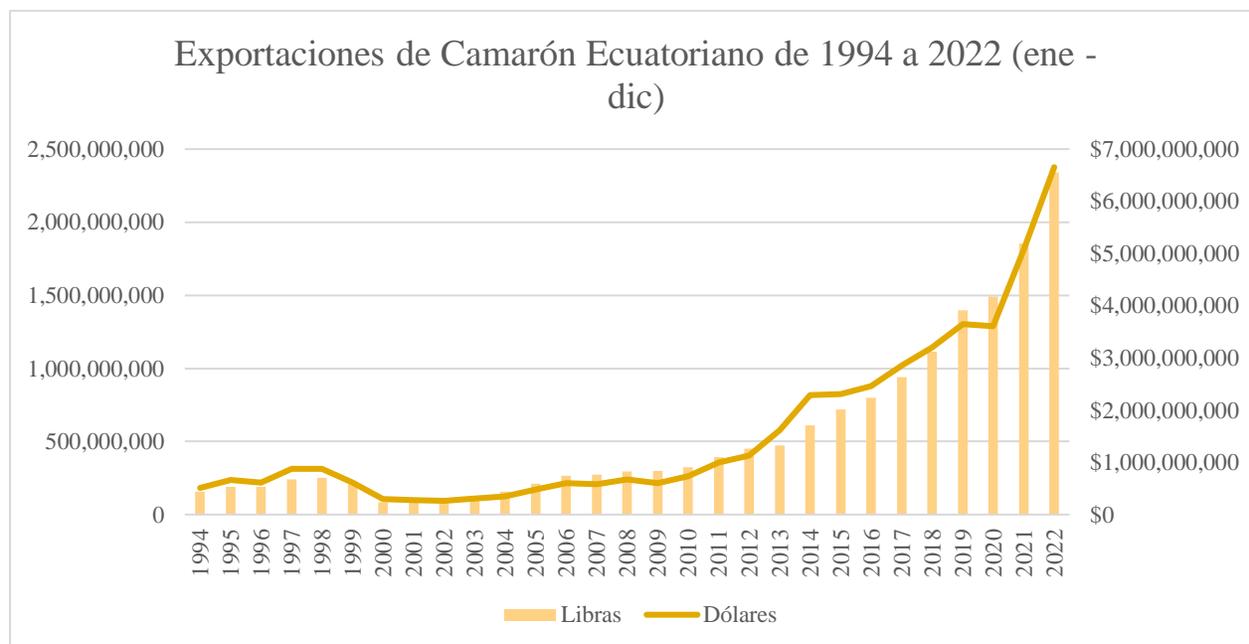
1.1 Introducción

La industria camaronesa del Ecuador hoy en día es una de las más importantes a nivel nacional e internacional. Según el reporte de diario El Universo [1], el país se ha posicionado como el primer exportador en productos orgánicos en la feria ibérica este 2023, razón suficiente para atraer a nuevos mercados y generar un crecimiento económico en esta área, como menciona la CAMAE [2].

Cómo se puede observar en la Figura 1.1 las exportaciones de camarón han despuntado de manera acelerada durante el último lustro. La región se encuentra en la necesidad de un desarrollo tecnológico de la misma intensidad, con el fin de suplir la demanda y multiplicar la producción.

Figura 1.1

Datos proporcionados por la CNA sobre el crecimiento de la industria camaronesa de Ecuador [3]



A partir de esta tendencia, el sector ha reaccionado con nuevas piscinas para crianza de camarones. Junto a estos nuevos espacios, se ha dispuesto la implementación de sistemas de medición y alimentación automática para camarones, y se ha investigado el uso de drones móviles.

Los datos obtenidos se procesan con técnicas de visión por computadora, y se empiezan a integrar algoritmos que usan IA. Cada una de las partes anteriores nombradas, tiene como meta la tecnificación de las tareas manuales y de baja confiabilidad que el sector aún arrastra.

Por ello, las imágenes de nuevas piscinas y estanques en los mapas satelitales tienden a estar desactualizadas, cubiertas por nubes, con baja precisión de geolocalización y a menudo carecen de una representación visual cuantificable de los obstáculos existentes en ellas. Cada uno de estos detalles le genera problemas a la nueva tecnología de equipos móviles que pretenden navegar en las piscinas, debido al riesgo de choque existente. Por esto se propone el desarrollo de un dron que puede mapear cada zona y obtener información de cada una de ellas para el estudio del camarón.

1.1.1 Descripción del problema

En el país, existe una empresa que se ha visto interesada en el mercado de camarones, y en búsqueda de nuevas tecnologías para satisfacer este mercado se ha encontrado en la necesidad de investigar equipos mecatrónicos y tecnología que faciliten varios procesos en el campo de la crianza de camarón. Por ello, se encuentra en el desarrollo de diversos equipos, que debido a sus proporciones requieren una compleja logística para ser movilizarlos, acompañado de un extremo cuidado en el manejo de estos para evitar daños en los sistemas mecatrónicos.

En las piscinas donde se han desplegado los equipos, como se muestra en la Figura 1.2, hay diversos obstáculos presentes como aireadores, alimentadores –manuales y autónomos– que generan preocupación y requieren de un sistema para mapear y detectar estos obstáculos, pues en los mapas satelitales que se usan para manejar la navegación de los equipos no aparecen estos obstáculos, otros están desactualizados respecto a la posición actual de los obstáculos, o incluso, los mapas no poseen la precisión adecuada respecto a los bordes de la piscina y menos de los obstáculos.

Adicionalmente, se ha identificado la falta de monitoreo constante de varios indicadores que afectan el crecimiento de los camarones. Los indicadores en cuestión son la temperatura y saturación de oxígeno, los cuales han encontrado ser los parámetros de mayor incidencia a lo largo del proceso del cultivo de camarón.

Figura 1.2

Piscina de camarón con un alimentador de obstáculo [4]



El sistema mecatrónico que se plantea como solución a este problema tiene como finalidad delimitar de manera precisa el perímetro de las piscinas y medir la distancia a los obstáculos que se encuentran en la superficie de las piscinas. Adicionalmente, monitorizar la temperatura y saturación de oxígeno.

1.2 Justificación del problema

La medición exacta de la posición en que se encuentra el límite y los obstáculos en las piscinas es prioritaria ya que los equipos que se encuentran en desarrollo, véase la Figura 1.3, por la empresa corren el riesgo de colisionar con elementos como el borde del estanque, aireadores, alimentadores o sensores, lo cual tiene el potencial de destruir la inversión realizada por la empresa, desmotivando el estudio y desarrollo de nuevos equipos.

Figura 1.3

Equipo en piscina, rodeado de soportes para alimentación manual y aireadores



Por otro lado, los parámetros como el nivel de oxígeno disuelto en el agua tienen repercusiones metabólicas ya que regula la adquisición de la energía que realiza el camarón [5]. Este último puede variar fácilmente dependiendo del agua con la que se reabastezcan las piscinas, especialmente si dicha piscina no cuenta con un aireador instalado.

Así también, la temperatura es un factor fundamental, ya que de superar los 34°C aumenta de gran manera la mortalidad en una piscina, siendo cuestión de días para matar toda la población [6]. Variaciones en la temperatura a su vez pueden concluir en una reducción del peso del producto final, que puede llegar hasta el 41% [7]. Y ya que el valor de comercialización va directamente relacionado con el peso del producto, se generan pérdidas de ingresos por la bajada de los precios de comercialización [8].

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Diseñar un dron acuático no tripulado con módulos para la identificación de obstáculos y monitoreo de piscinas de acuicultura, con capacidad de manejo remoto y uso de sensores sumergibles, cumpliendo con reglamentos de mínima intrusión y huella ecológica en industrias camaroneras.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- ❖ Diseñar la estructura de una embarcación con dimensiones apropiadas para la navegación en una piscina camaronera.**
- ❖ Realizar el diagrama de conexiones eléctricas de los componentes electrónicos.**
- ❖ Configuración del controlador de navegación y avance de la embarcación.**
- ❖ Modelar del sistema de procesamiento de datos obtenidos por los sensores.**
- ❖ Integrar los sistemas de navegación, monitoreo y transmisión de datos del dron.**

1.4 Marco teórico

1.4.1 Tipos de embarcaciones usados para control a distancia

En el área náutica, existen muchos tipos de embarcaciones para navegar diferentes tipos de aguas, más para el alcance del presente proyecto es necesario revisar aquellos comúnmente utilizados para ser controlados de manera remota. Cabe recalcar que la mayoría se rige por el principio fundamental de Arquímedes para mantenerse a flote, es decir, se considera dentro del diseño cierto volumen en la parte inferior para estar sumergido dentro del agua.

1.4.1.1 Lancha a motor. La estructura más común en la navegación moderna, cuya forma empieza por una punta que se alza sobre la superficie del agua para sortear el agua y las olas, y se convierte rápidamente en una geometría prismática, generalmente con una cara plana superior y dos caras adyacentes que se ven en forma de V al seccionarla frontalmente, vista lateralmente en la Figura 1.4. Dada la forma de la estructura y la capacidad de carga del motor, puede alcanzar grandes velocidades.

Figura 1.4

USV con estructura de lancha motora [9]



1.4.1.2 Aerodeslizador. Una nave diseñada con el propósito de mantener una baja resistencia al avance y alguna forma de suspensión de muelle [10]. Como se observa en la Figura 1.5, la resistencia se reduce al evitar el contacto directo con la superficie del agua mediante el uso de un colchón que contiene aire, el mismo que actúa como muelle, debido a su capacidad neumática y amortiguación.

Figura 1.5

Aerodeslizador militar LCAL (Landing Craft Air Cushion) [11]



1.4.1.3 Catamarán. Es una embarcación formada por dos cascos unidos por un marco, que se beneficia de su sistema de mínimo contacto con la superficie del agua para obtener menor resistencia al avance y alcanzar mayor velocidad.

El diseño de doble casco es mayormente seleccionado debido a la estabilidad al balanceo en comparación con el diseño monocasco [12]. Esto se ve reflejado en una mayor eficiencia del gasto energético, por ello se ha empleado en proyectos vanguardistas como destaca la Figura 1.6.

Figura 1.6

Catamarán diseñado por PlanetSolar y alimentado por paneles solares [13]



1.4.2 Propulsión en una embarcación

Con el objetivo de navegar por agua, se han desarrollado varias formas de propulsar una embarcación. Se presentan a continuación las más usadas.

1.4.2.1 Timón-Hélice La configuración más utilizada en la actualidad debido a su costo-beneficio y la confiabilidad que existe respecto a este sistema. Si se compara con su análogo terrestre, existe un motor encargado de transmitir el torque necesario para moverse a una rapidez requerida, y otro motor que sirve para direccionar la nave en el rumbo que se desea. El motor principal mueve la hélice, de modo que se genere el empuje necesario para que se mueva el bote, mientras que el motor de paso gira el timón detrás de la hélice con el fin de girar la embarcación [14].

1.4.2.2 Hélice con empuje vectorial Es un sistema especializado que utiliza un motor de paso o servo direccional para orientar el motor principal. Se indica que este tipo de propulsión debe estar excluido de embarcaciones que posean un timón aparte de los motores. Se utiliza el servomotor para desviar el motor principal en un ángulo llamado ángulo de desviación, que tiene un valor máximo [15]. El sistema que controla este motor debe moderar el porcentaje de potencia que se usa en aceleración del que se usa en el giro del motor.

1.4.2.3 Skid Steering Este es el nombre que recibe a la configuración de motores que permiten un desplazamiento con gran precisión en cuerpos acuáticos, permite desplazarse rápidamente en líneas rectas y realizar curvas bien cerradas con movimientos de pivote [16]. Esto se debe a que se aplican diferentes velocidades en los rotores encargados del impulso, lo que desemboca en una modulación del avance sensible a los cambios de giros.

1.4.3 Dificultades en la parametrización de las piscinas de camarón

Las piscinas camaroneras en las provincias de Guayas y El Oro poseen una extensión de 1.5 hectáreas de superficie en promedio, siendo los estanques de mayor extensión registrados de 8 y 10 hectáreas [7]. Aunque la superficie de estas regularmente tiende a ser rectangular, lo cierto es que no existe un estándar, como se percibe en la Figura 1.7.

Figura 1.7

Imagen satelital mostrando las diversas formas de las piscinas de camarón en campo [9]



1.4.3.1 Ecolocalización por sonar. La ecolocalización es la capacidad de medir la distancia relativa entre el emisor y un objeto a cierta distancia, por medio de la escucha de ondas mecánicas reflejadas por el objeto consecuencia de la emisión de ondas mecánicas por parte del receptor. Este concepto se aplica al *Scanning* sonar, abreviación para *Scanning Sound Navigation and Ranging*.

El sonar activo transmite pulsos de sonido a un medio acuático, y recoge los ecos que retornan cuando cada onda es reflejada por una superficie frente al sonido, como se puede apreciar en la Figura 1.8. Combinando la velocidad conocida del sonido en el agua con el tiempo de recepción de los ecos, el sonar puede calcular la distancia que ha recorrido el sonido. La ecuación para determinar la distancia acústicamente es:

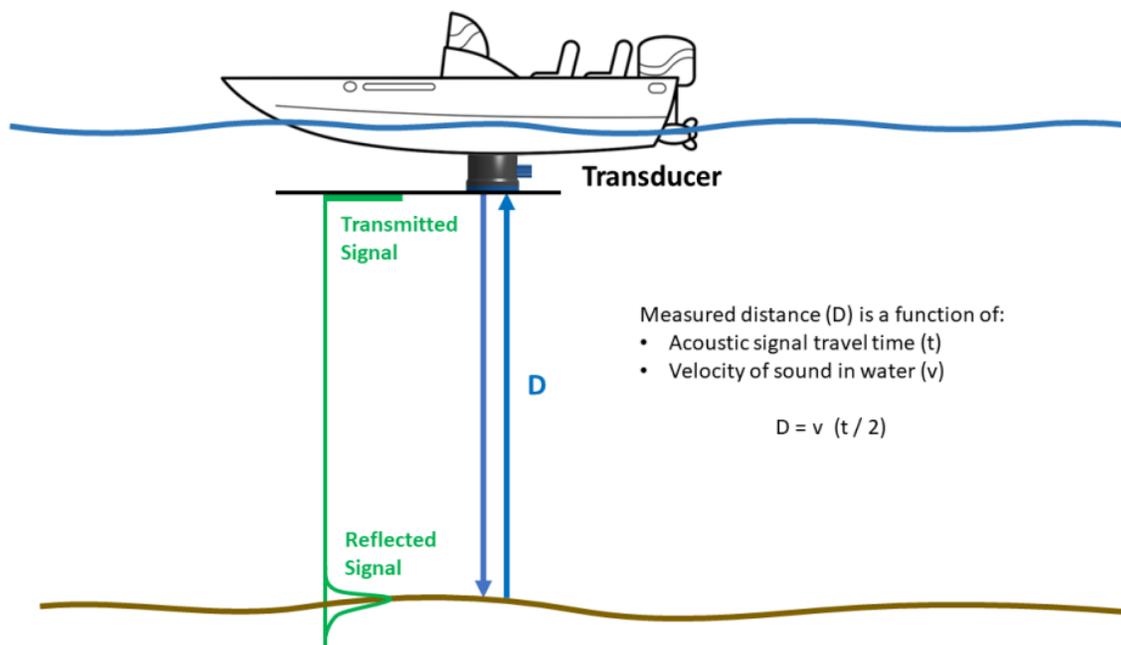
$$d = v * \left(\frac{t}{2}\right) \quad (1.1)$$

Donde d es la distancia recorrida, v la velocidad conocida del sonido en el agua y t el tiempo medido de retorno del eco.

Por tanto, las grandes diferencias en la velocidad del sonido pueden afectar a la precisión del alcance de los blancos. Normalmente, la velocidad del sonido en agua salada es de unos 1500 m/s, pero puede variar en función de la temperatura del agua, la salinidad y la profundidad de funcionamiento del sonar [17]. Se debe calcular la velocidad del sonido operativa en la zona para obtener mejores resultados.

Figura 1.8

Sistema de medición de cama acuática por medio de sonar [18]



1.4.4 Geolocalización

El sistema de referencia global WGS 84 es el estándar actual en cartografía, geodesia y navegación satelital. Actualmente existe varios sistemas satelitales que permiten unirse a su transmisión de datos para obtener latitud y longitud.

Otros parámetros son posibles calcularse a través de ellos, como la altura relativa sobre el terreno o el nivel del mar, el cual requiere de la carga de mapas satelitales del terreno para referencia. También se tiene el cálculo de la dirección en conjunto a un compás, conocido como *heading* en inglés, el cual se basa en los puntos cardinales, establece al norte terrestre como el grado 0 y gira en dirección horaria.

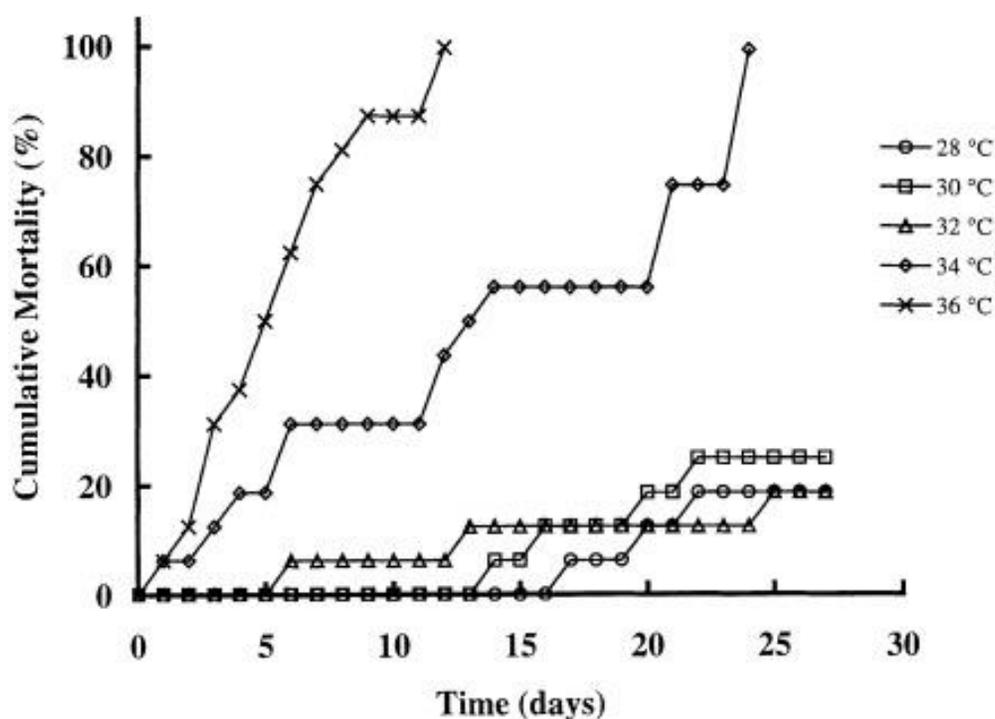
Para la obtención de un nivel óptimo de navegación, el nivel esperado de precisión es de 7 decimales. Esta es la referencia dada por protocolos de comunicación de acceso libre como MAVLink, donde la calidad de la señal gobierna sobre todo aspecto de la navegación satelital [19].

1.4.5 Temperatura de cultivo del camarón

El cultivo de camarón requiere de temperaturas adecuadas para la supervivencia de este marisco. Temperaturas fuera del rango óptimo reducen la ingesta de alimento, y por ende la tasa de crecimiento, concluyendo en un producto final con menor peso, lo que reduce ganancias para las camaroneras.

Figura 1.9

Gráfica de porcentaje de mortalidad de una población de camarones a través de los días [6]



Además, la temperatura puede tener un gran efecto en la mortalidad del camarón. Si bien esta incidencia podría parecer relativamente lenta, en caso de mantener una temperatura de 34 grados Celsius la mortalidad puede llegar al 20% en los primeros 5 días. Incluso si la temperatura sigue aumentando, la incidencia es mucho más rápida como se aprecia en la Figura 1.9.

1.4.6 *Saturación de oxígeno en piscinas de camarón*

La importancia de la concentración de oxígeno de las piscinas viene dada por la implicancia de esta en el metabolismo del camarón. Ya que el oxígeno es la molécula que, de manera general, les permite a los organismos aerobios aprovechar la energía que se obtiene de la disolución de los enlaces en las moléculas de carbono [5].

Tal es el caso de la sensibilidad a este parámetro, que reducciones en la concentración de oxígeno de 5 a 4 mg/L puede disminuir hasta el 25% de la energía que busca producir biomasa [5]. En cambio, respecto a la mortalidad, con experimentos de concentración letal (LC del inglés *Lethal Concentration*), se ha identificado que una concentración de 0.77 mg/L puede matar el 50% de la población de camarón [20]. Para una mayor indicación véase la Tabla 1.1.

Tabla 1.1

Rango de concentraciones de oxígeno y su efecto en el camarón

Concentración de oxígeno	Efecto en el camarón
Menos de 1 mg/L	Letal si se expone por más de unas horas.
De 1 a 5 mg/L	Baja el crecimiento si la exposición es continua y aumenta la susceptibilidad a enfermarse.
5 mg/L a saturación	La mejor condición para el buen crecimiento.
Sobresaturación	Normalmente no se da en estanques.

1.5 Estado del arte

En el último lustro, el sector camaronero ha dado un salto tecnológico en cuanto a la creación de sistemas de alimentación [21] [22], al integrar protocolos de comunicación, monitorización y análisis de datos. Como se observa en la Figura 1.10, el uso de alimentadores automáticos ecológicos, AAE por sus siglas, tiene a sus espaldas toda una red de radiocomunicación que utiliza protocolos como LoRa, de específicas frecuencias, para obtener datos y enviar comandos para soltar el alimento a ciertas horas del día.

Figura 1.10

Esquema de funcionamiento de los alimentadores controlados por sistemas IoT [22]



1.5.1 Vehículos no tripulados

En el campo de vehículos no tripulados, a los cuales se referirá desde ahora con el nombre de drones, no hay nada establecido como norma en el país. A pesar de ello, existen proyectos que pretenden emplear estos drones para la alimentación en piscinas de larga extensión. Como se puede apreciar en la Figura 1.11 a un dron alimentador de camarón que posee un sonar en forma de

cámara acústica, también conocido como hidrófono, para la detección de camarones y un oxímetro para detección de saturación de oxígeno. Las características que promete el dron son 10 hectáreas de cobertura, con una velocidad crucero de 4 m/s, es decir 14.5 km/h, con alimentación por baterías de litio de 200,000 mAh a 14V y navegación por GPS.

Figura 1.11

Imagen de marketing para venta de super dron alimentador de camarones desarrollado por Duke en 2019 [23]

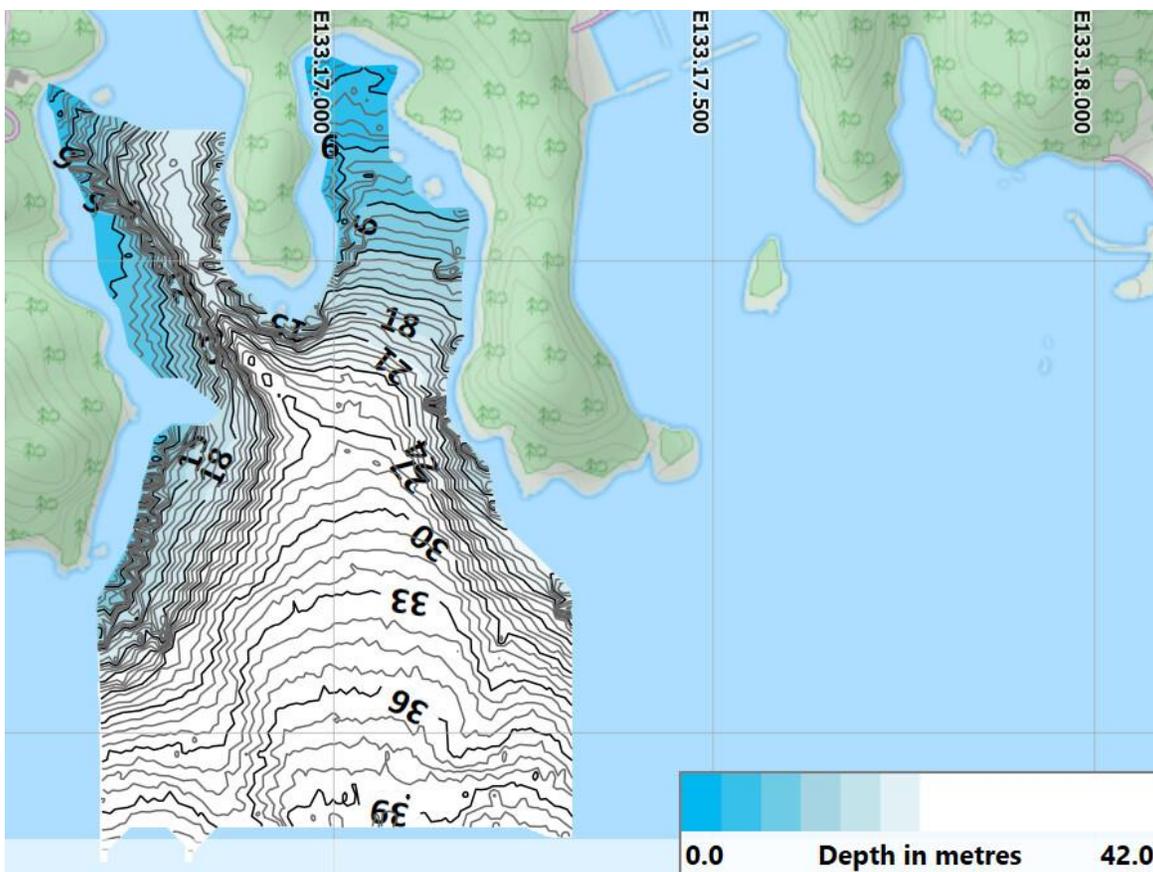


1.5.2 Mapeado de zonas acuáticas

Existen referencias de sistemas de mapeado y análisis de grandes extensiones de agua por medio de drones acuáticos. En el proyecto realizado en Okinoshima, Japón en 2021 [24], se realizó el mapeado mediante un equipo sonar, el cual utiliza la ecolocalización con el propósito de medir la profundidad y datos dispersos.

Figura 1.12

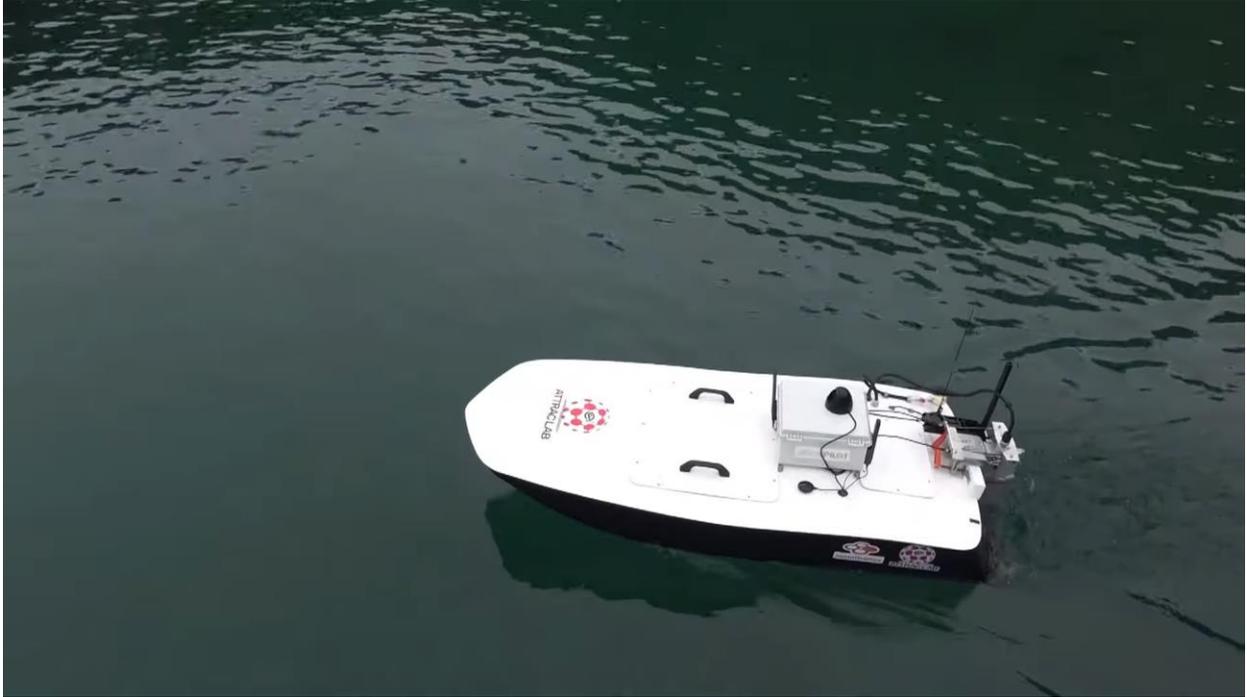
Resultado topográfico del proyecto de mapeado en Okinoshima, Japón [24]



Para completar esta tarea, se utiliza un vehículo acuático tipo bote de dimensiones 185 cm x 30 cm x 30 cm, sin tripulación y manejado a distancia, además de poseer la capacidad de realizar viajes autónomos, es decir, sin el comando directo de un ser humano, el cual se muestra en la Figura 1.13. En la Figura 1.12, se observa el resultado topográfico del proyecto en dos dimensiones, con las líneas de nivel que indican por color y número la profundidad en metros desde la superficie.

Figura 1.13

Vehículo acuático no tripulado utilizado para la misión de Okinoshima, Japón [9]



Capítulo 2

2.1 Metodología

Este capítulo contiene las etapas y los pasos a seguir para el proceso de selección y diseño de la solución que se ha presentado para la problemática que se está abarcando. Se encontrará el detalle de los requerimientos del proyecto, así como el traslado de estos hacia parámetros de diseño que explica cada una de las funciones que necesita el dron para su correcto funcionamiento.

2.2 Requerimientos de diseño

La empresa ha definido una serie de requerimientos para el sistema de mapeo de las piscinas y la identificación de obstáculos. A su vez, se han planteado ciertas características deseables en base a las necesidades de monitoreo de los parámetros de temperatura y oxígeno disuelto. Toda esta información se encuentra condensada en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1

Requerimientos para el diseño por categoría

Tipo	Criterios
Mecánicos	Superficie ocupada por la embarcación menor a 1m ² . Carcasa de compuesto de fibra de vidrio IP68 de 350 x 250 x 150 mm. Sistema <i>Skid Steering</i> con motor bidireccional trifásico sin escobillas encapsulado.
Control	Placa base Pixhawk con módulo de control CubeOrange. Módulo de geolocalización multibanda de alta precisión HerePro IP68. Módulo de Radiofrecuencia de larga distancia RFD900x para telemetría.
Sensores	Sonar BlueRobotics Ping2. Rango de temperatura a medir entre 15 a 40 °C. Rango de SatO2 a medir entre 0.3 mg/L y 10 mg/L. Precisión de distancia a objetos de 5 cm.
Informáticos	Almacenar la información de sensores del dron. Visualizar de resultados superpuestos en un mapa.

2.3 Selección de alternativa de solución

Se han propuesto cuatro alternativas de solución, que contemplan diferentes tipos de naves no tripuladas para el mapeo de piscinas, identificación de obstáculos y monitoreo de parámetros. Estas son las siguientes:

- **Alternativa 1:**

Diseño de vehículo aéreo no tripulado tipo cuadricóptero, equipado con cámara para el reconocimiento del perímetro de las piscinas en post procesamiento con inteligencia artificial, adicionalmente una cámara térmica para medición de temperatura.

- **Alternativa 2:**

Diseño de una embarcación no tripulada del tipo catamarán (ver en la sección 1.4.3.2), con sensor ultrasónico para mapeo de la piscina y sensores para detección de obstáculos, equipado con un sensor tipo termocupla para la temperatura y un sensor de oxígeno disuelto.

- **Alternativa 3:**

Diseño de una embarcación no tripulada tipo aerodeslizador, con sensores ópticos y detectores de objetos para medir tanto el borde como los obstáculos de la piscina, además de un sistema de sensores para medición de temperatura y saturación de oxígeno.

- **Alternativa 4:**

Diseño de una embarcación no tripulada tipo lancha, con sensores ópticos y detectores de objetos para medir tanto el borde como los obstáculos de la piscina, además de un sistema de sensores para medición de temperatura y saturación de oxígeno.

Para la selección de la mejor alternativa, se realizó una evaluación fundada en criterios relevantes para el cliente. En la Tabla 2.2 se presentan los niveles de relevancia de cada criterio,

con una correspondiente ponderación a cada uno en base a lo manifestado por el cliente. Pero primero una breve descripción de cada uno:

- **Versatilidad:** Facilidad de ser transportado entre distintas ubicaciones para realizar pruebas de mapeo y monitoreo.
- **Maniobrabilidad:** Capacidad de generar desplazamientos relativamente precisos en las piscinas de manera remota.
 - **Precisión:** Resolución y precisión de las coordenadas, los obstáculos y los parámetros a ser medidos.
 - **Desempeño:** Relación de área cubierta en un tiempo determinado.
 - **Peso:** Masa total por unidad del producto a diseñarse.
- **Mantenimiento:** Costos y complejidad del mantenimiento, así como la frecuencia necesaria del mismo.

Tabla 2.2

Criterios para evaluación de alternativas

Criterio	Importancia	Peso	Porcentaje de decisión
Versatilidad	4	2.5	16%
Maniobrabilidad	2	3.5	23%
Precisión	1	4.0	26%
Desempeño	3	3.0	19%
Peso	5	1.5	10%
Mantenimiento	6	1.0	6%
Peso total		15.5	100%

En base a estos criterios se ha realizado una evaluación de cada una de las 4 alternativas para ponderar la mejor solución y proceder con el diseño.

Tabla 2.3*Matriz de decisión con la ponderación de las alternativas*

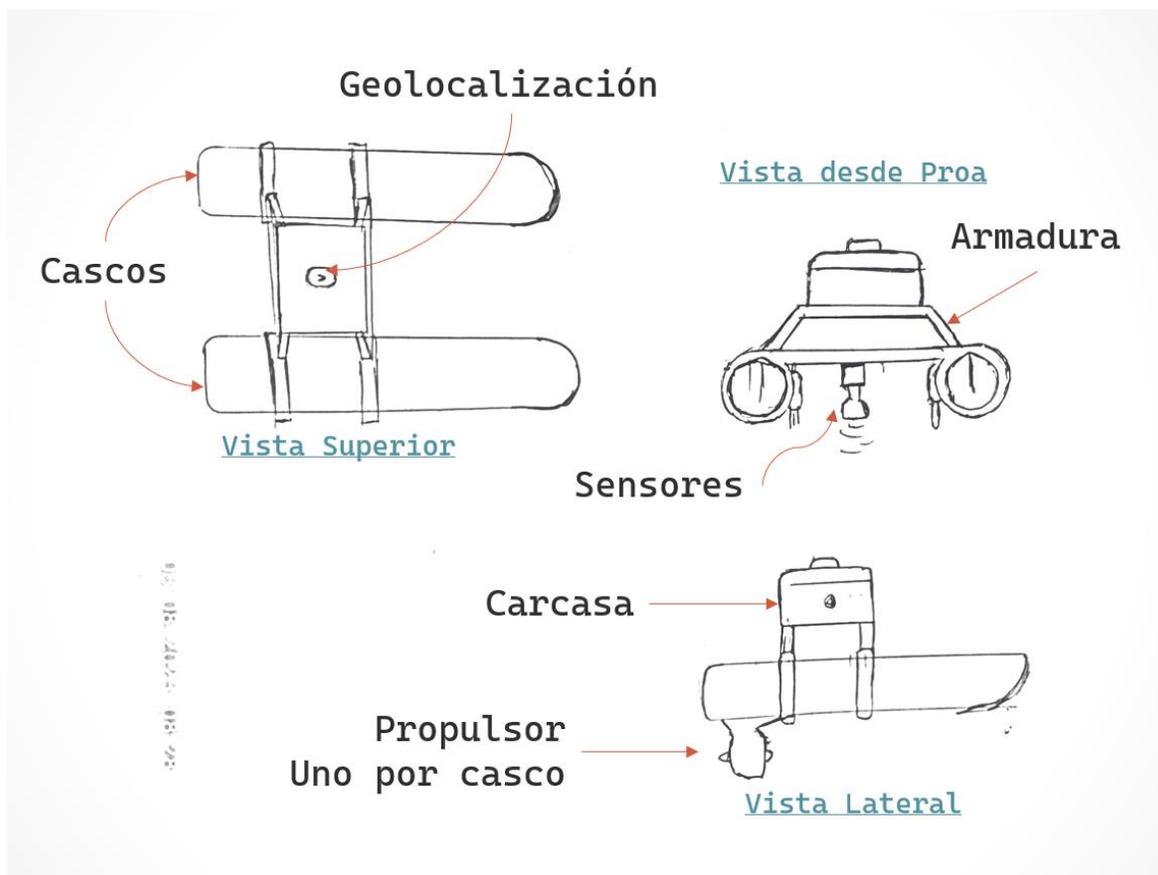
Pesos	Criterio						Resultados		
	2.5	3.5	4	3	1.5	1	Puntaje sin peso	Puntaje con peso	Prioridad
Opciones	Versatilidad	Maniobrabilidad	Precisión	Desempeño	Peso	Mantenimiento			
Alternativa 1	7	4	5	9	9	6	40	78	3
Alternativa 2	7	8	8	7	8	8	46	86.5	1
Alternativa 3	5	7	8	7	8	8	43	78	3
Alternativa 4	7	7	8	8	7	7	44	83.5	2

Según la matriz de decisión de la Tabla 2.3, se ha identificado la alternativa 2 como la primera opción a considerar para el desarrollo del sistema. Pues es la que maneja un mayor equilibrio entre los criterios evaluadores, proponiendo un diseño simple que permite un mantenimiento sencillo, y cuenta con un buen desempeño y calidad de medición.

2.4 Diseño conceptual

Figura 2.1

Boceto del vehículo acuático no tripulado



El prototipo del dron acuático considera una embarcación del tipo catamarán con una base transversal para apoyar una carcasa IP68 donde se encuentra el control de navegación, el receptor de radiofrecuencia, el módulo de distribución de poder, la batería y el módulo de monitorización para recolectar datos de los sensores y el sonar.

Como señala la Figura 2.1, encima de esta caja se coloca al módulo de geolocalización con vista directa al cielo, mientras que debajo de la caja se coloca el sonar directamente sumergido en el agua. Los sensores de detección de objetos, temperatura y oxígeno se deben sujetar a los cascos de la embarcación.

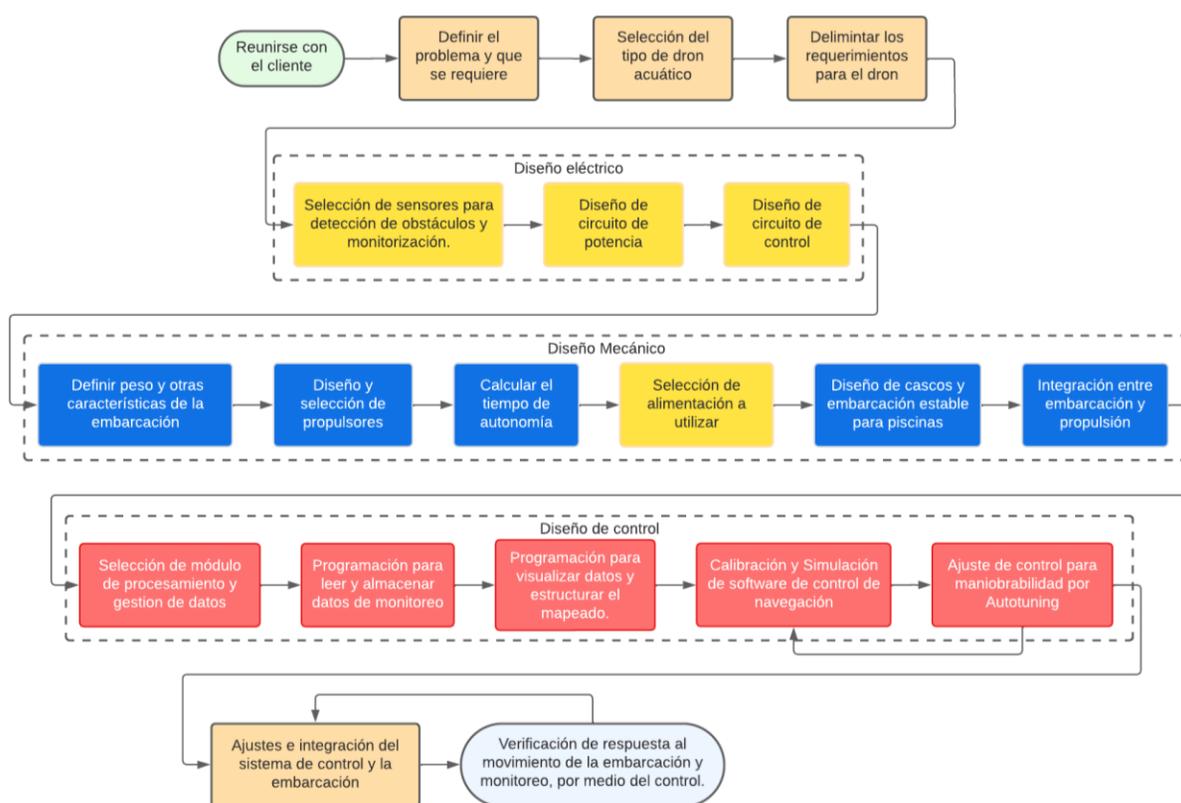
El sistema de navegación se ve propulsado por dos motores con sus hélices, uno por casco, situados en la popa del catamarán, conectados por cable al sistema de suministro eléctrico y a la señal de frecuencia para controlar cada motor. Esta señal proviene del controlador del vehículo, encargado de recibir las órdenes de la radiofrecuencia para ponerlo en marcha remotamente. Además, lee las coordenadas de georreferencia y se las comunica al módulo de monitorización.

2.5 Proceso de diseño

A continuación, la Figura 2.2 presenta las distintas etapas de diseño para concluir con una embarcación no tripulada controlada remotamente capaz de detectar obstáculos y medir temperatura y oxígeno disuelto en el agua.

Figura 2.2

Proceso de diseño



2.6 Parámetros de diseño eléctrico

Para lograr el diseño del dron, se ha requerido usar el controlador de navegación con el cual trabaja el cliente del proyecto, llamado Cube Orange. Esta tarjeta es muy robusta en cuanto propiedades físicas como a conexiones electrónicas, y es sumamente versátil debido al ecosistema de control bajo el que se maneja, el cual posee amplia documentación y una comunidad activa que facilita su uso.

Además, el cliente también ha puesto a disposición el uso de diversos elementos que tiene disponibles, como baterías o cajas de paso. En el caso de la batería se usará de manera preliminar una de 4 celdas, con una capacidad de 6,500 mAh a un voltaje de 14.8 V, luego de escoger el sistema de propulsión esta batería podrá ser reconsiderada. El sonar, GPS y el sensor lidar también han sido dispuestos por el cliente, son el Sonar BlueRobotics Ping2, HerePro Multi-band RTK Alpha y el ST VL53L1X Lidar respectivamente.

2.6.1 Selección de sensor de oxígeno disuelto

A continuación, se presentan dos opciones de sensores de oxígeno disuelto. Estos sensores ya cumplen con los parámetros base de rango de medición y condiciones de funcionamiento. La Tabla 2.4 presentará diferencias puntuales que nos permitan seleccionar uno de los dos.

Tabla 2.4*Comparativa entre sensores de oxígeno disuelto*

Características	DISEN DS380	DO Sensor InPro6960i/12/220
Imagen		
Principio de medición	Fluorescencia óptica	Fluorescencia óptica
Tiempo de respuesta	5 s	< 20 s
Aplicación principal	Acuicultura	Alimentación y bebidas

Se observa que los dos sensores presentan el mismo principio de medición, pero la diferencia en el tiempo de respuesta es de 4 a 1 con ventaja para el DISEN DS380. Además, a pesar de que el DO Sensor InPro6960i/12/220 está capacitado para trabajar en piscinas, el sensor DISEN DS380 está especialmente desarrollado para la industria de la acuicultura y su aplicación ha sido probada en piscinas para camarones previamente.

2.6.2 Selección de sensor de temperatura

En la Tabla 2.5 se observarán 2 sensores de temperatura preseleccionados que cuentan con las características bases para el sistema, pues ambos son sumergibles y cubren el rango de temperatura requerido. Además, ambos sensores cuentan con una pantalla que puede facilitar las tareas de calibración del sensor y la verificación de que la interfaz del sistema esté trabajando de manera adecuada.

Tabla 2.5

Comparativa entre sensores de temperatura

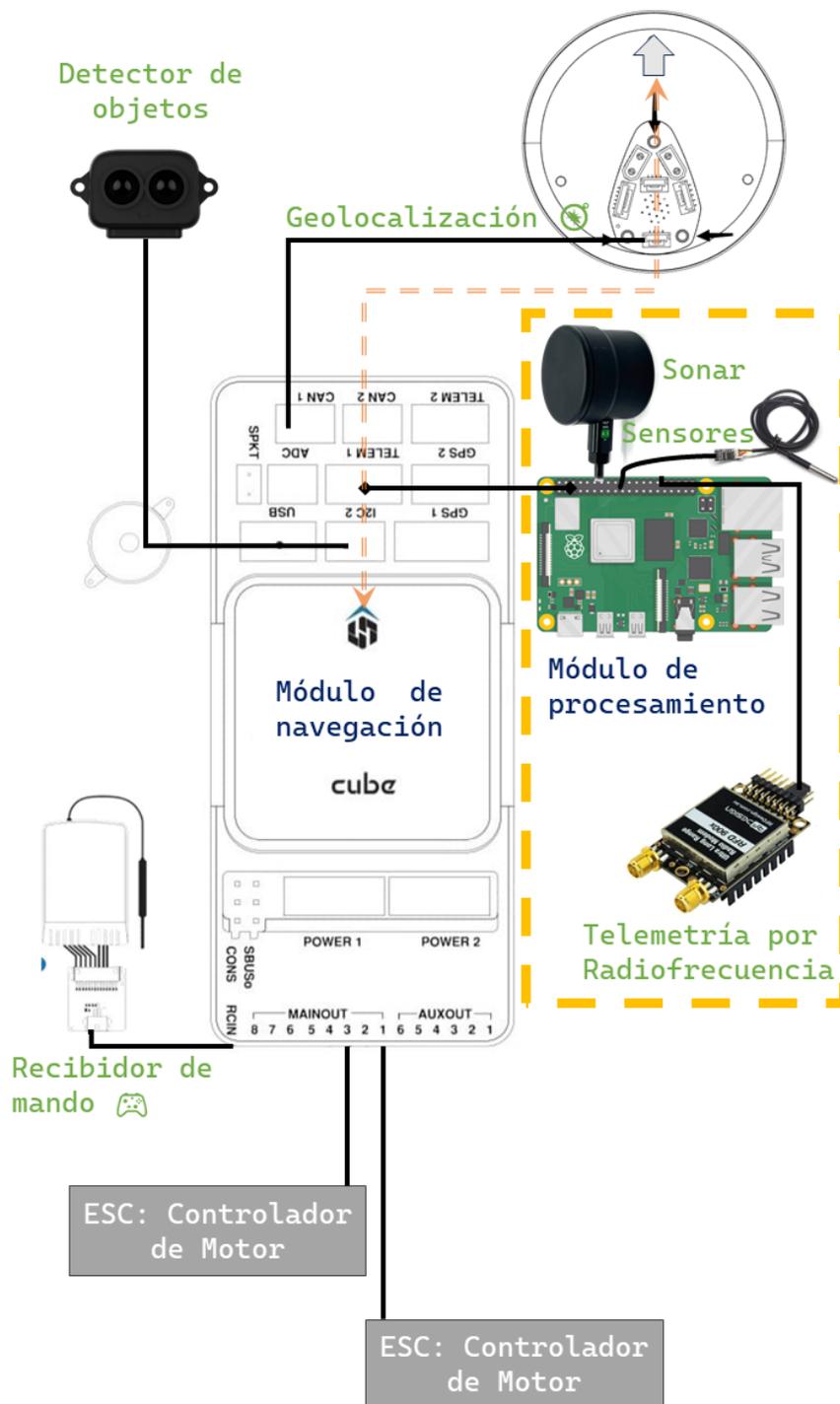
Características	TERRARIO ACUARIO	MaxiTemp
	 	
Rango	-50 ° C a + 70 ° C	-5 a +45°C
Interfaz	No incluye	Polaris Link
Aplicación	Acuicultura	Acuicultura

La Tabla 2.5 muestra que ambos equipos fueron diseñados para la acuicultura, lo que representa una gran ventaja ya que esto probará resiliencia ante el ambiente en el que trabajará. Pero únicamente el MaxiTemp cuenta con una interfaz de comunicación, lo que facilita su integración al resto del sistema.

2.6.3 Diagrama esquemático de control

Figura 2.3

Diagrama de conexiones controladas por el módulo de navegación y procesamiento



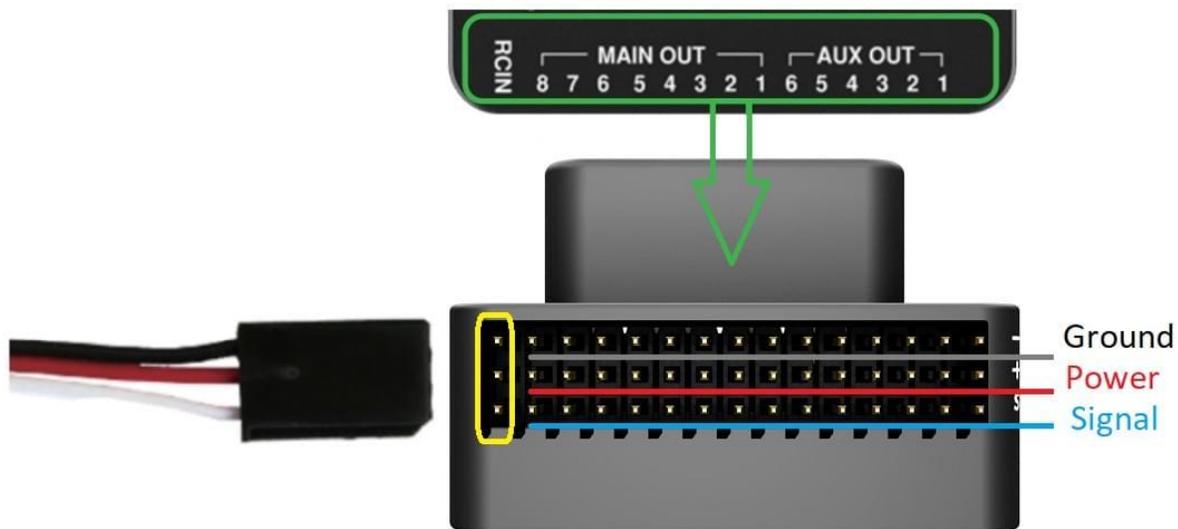
Nótese que en la Figura 2.3, las flechas inscritas en el módulo de navegación y el módulo de geolocalización se encuentran alineadas en la misma dirección. Eso se debe a que el módulo de geolocalización posee un compás, además de ser capaz de obtener información de diferentes sistemas globales de navegación satelital, GNSS por sus siglas, como lo son BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS, QZSS. Cumple con los protocolos de protección contra elementos IP68, admite tensiones entre 6 y 40 V para acoplarse fácilmente a diferentes alimentaciones, y posee una red circular de luces LEDs que pueden ser programadas internamente o por medio de lenguaje Lua.

2.6.4 Diseño de circuito electrónico detallado

En los planos anexos, se puede observar las conexiones eléctricas dispuestas para llevar a cabo la implementación del diseño dado. Cabe notar que la mayoría de los conectores tienen un empate único y no requieren mayor explicación. En el caso de señales de motores, salidas del tipo PWM o GPIO, se utiliza la sección de puertos principales y auxiliares en el Cube Orange como se puede observar en la Figura 2.4. Nótese que el puerto marcado en amarillo es un puerto PPM, específicamente diseñado para la comunicación por radiofrecuencia, generalmente usado para los radiocontroles.

Figura 2.4

Localización de puertos principales y auxiliares y señalización de cableado [25]

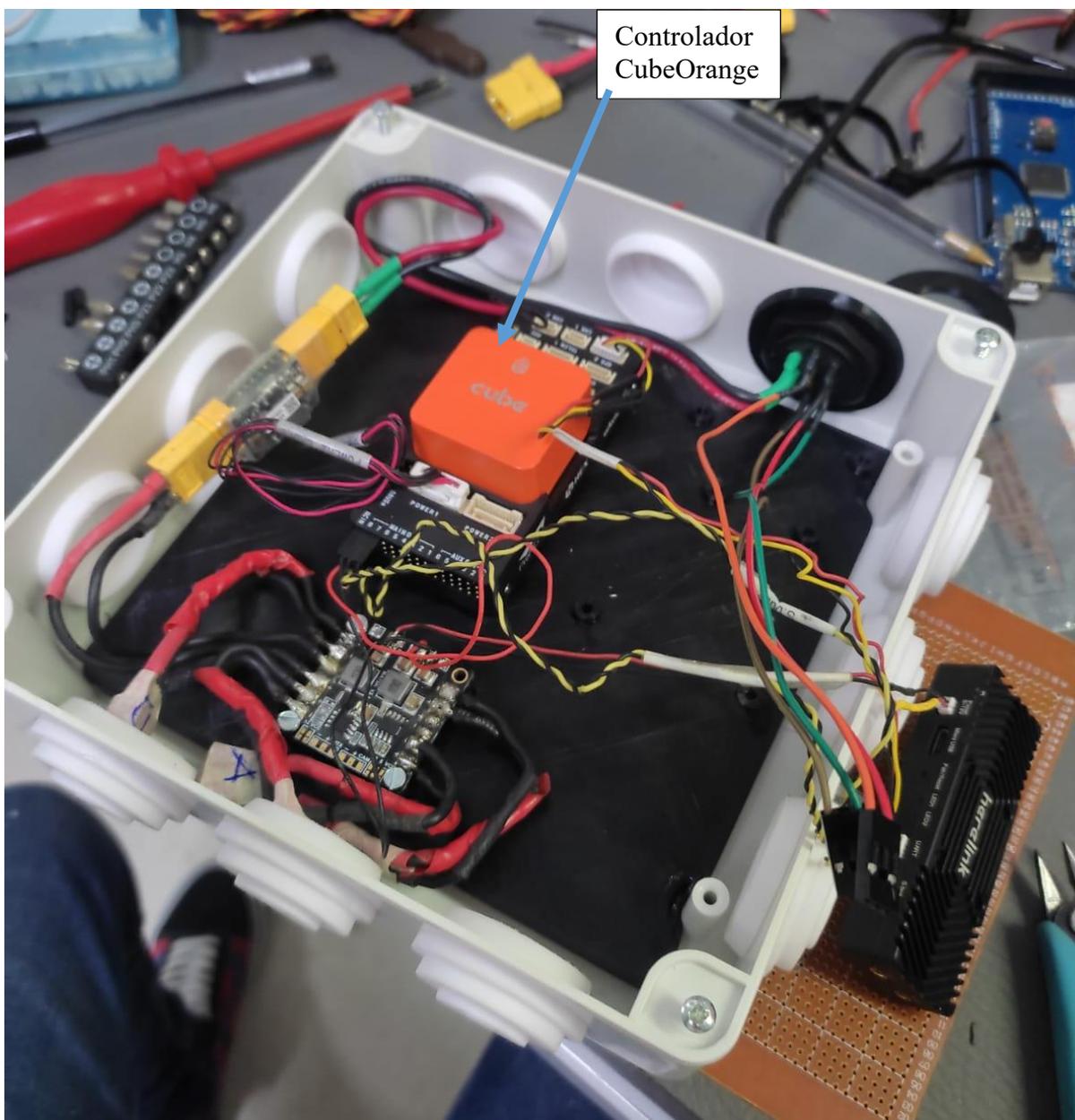


En el caso de los puertos seriales, la tarjeta controladora cuenta con dos, ambas identificadas como GPS tienen la capacidad de usarse de la misma manera.

En la Figura 2.5, se observa un espacio donde se ubica el controlador de navegación conectado a un monitor de batería, mismo que le entrega poder y a su vez este parte de una placa de distribución de poder. También se observa la conexión del controlador al receptor de radiocontrol por medio de telemetría y radiofrecuencia. Este modelo tiene un suministro eléctrico externo por lo que tiene un conector en el parte superior dedicado para ese trabajo.

Figura 2.5

Configuración de conexiones eléctricas para el controlador de navegación de un USV



2.6.5 *Conexión con el sistema de visualización.*

Para realizar la transmisión de datos entre el módulo de procesamiento del dron y el ordenador para visualizar los datos, se utiliza un acople de módulos de radiofrecuencia en la banda de 900 MHz. El uso del módulo RFD900x de RFDesign ha sido parte de los acuerdos con la

empresa, siendo un excelente modelo de trabajo gracias a su rápida respuesta de conexión y sus características. Entre estas se puede llegar a un alcance de 40 km de conexión en exteriores con línea de visión directa según la configuración de la antena, con un extenso soporte para sinfín de antenas, además de ser portable.

Antes de alimentar este módulo, es importante que primero hayan sido conectadas las antenas, pues sirven de resistencia de carga, como se puede observar en la Figura 2.6. No se debe conectar el pin TX a pines que manejen amperajes superiores a 1 A. Se recomienda de forma activa alimentar el módulo directamente a la fuente de alimentación o usar una salida proveniente de esta con 5 V.

Figura 2.6

Configuración de módulo de radiofrecuencia para lectura de datos

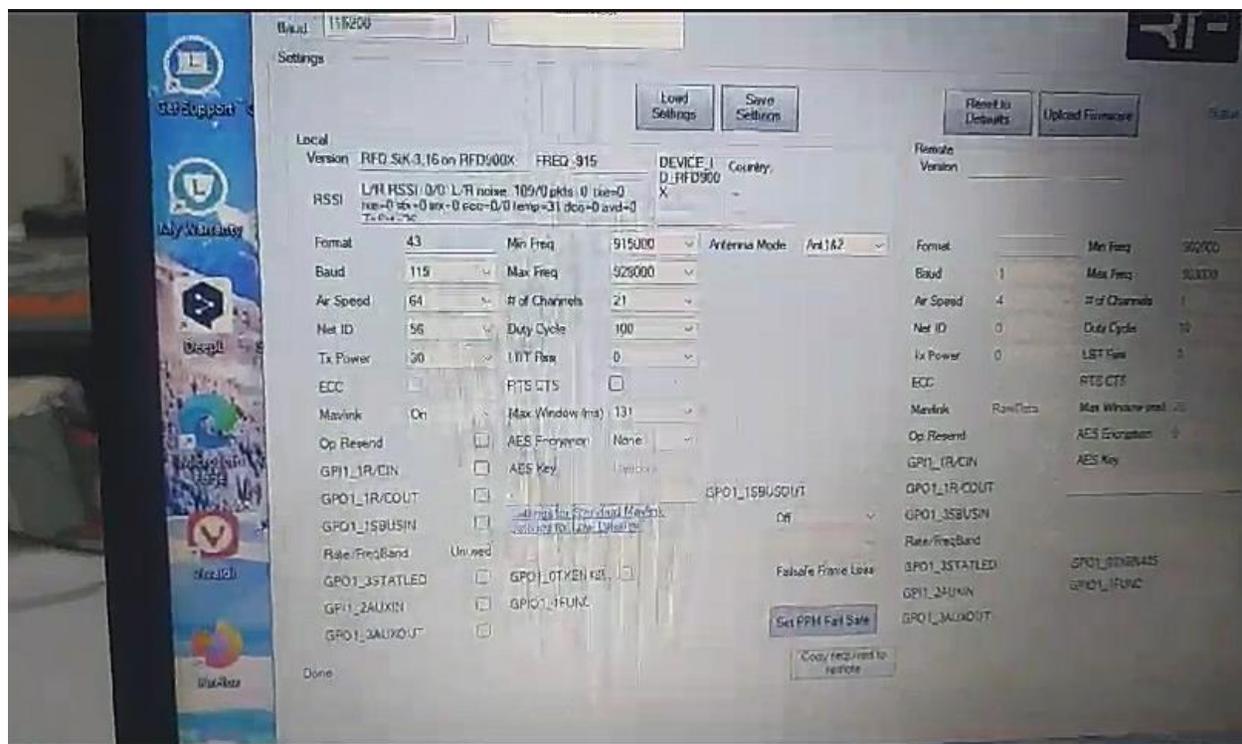


Para usar dos módulos de radiofrecuencia en una misma red, es necesario configurar cada módulo con la misma velocidad de transmisión en baudios, la velocidad en aire, el identificador

de red para buscar señales en la red específica y descartar cualquier otra, el número de canales abiertos y el interruptor para el protocolo MAVLink, lo cual se muestra en la Figura 2.7.

Figura 2.7

Pantalla de configuración del módulo de radiofrecuencia



2.7 Parámetros de diseño mecánico

En la Tabla 2.6 se presenta un desglose de la masa del sistema en base a los primeros componentes del sistema. Esta será una masa preliminar que aumentará conforme se diseñe la estructura de la embarcación, o se hagan cambios, por ejemplo, en la batería, por esto se contabilizarán 2 kg adicionales. Además, resta contabilizar la masa de la estructura de la embarcación, es decir de los cascos, las vigas y la plataforma de la embarcación.

Tabla 2.6*Distribución de la aproximación de la masa*

Componente	Masa
Carcasa o <i>housing</i>	1,560 g
Baterías	600 g
Sonar	190 g
Módulo de geolocalización	110 g
Propulsores (x2)	100 g c/u
Varios	340 g
Factor de seguridad	2,000 g
Total	5,000 g

En esta tabla se pueden visualizar valores preliminares para la masa de componentes como las baterías y el sistema de propulsión. Por otro lado, en la Tabla 2.7 se despliegan los distintos parámetros con relevancia para el diseño mecánico, incluida la masa del *housing* y los componentes electrónicos previamente detallada, así como la masa estimada de la estructura de la embarcación.

Tabla 2.7*Parámetros para el diseño*

Parámetros	Requerimiento
Masa <i>housing</i> y componentes electrónicos	5 kg
Masa estimada de estructura	2 kg
Masa total estimada	7 kg
Autonomía esperada	40 min
Dimensiones del <i>housing</i>	35l x 25w x 15h cm

2.7.1 Selección de propulsión para el dron

Entre los requisitos indicados para la creación del dron acuático, se especifica el uso de un sistema de propulsión del tipo *Skid Steering*, nombrado en la sección 1.4.2.3, el cual se consigue

en un entorno acuático por medio de 2 propulsores submarinos, que contiene internamente un motor DC trifásico sin escobillas capaz de girar en ambos sentidos. De manera externa el encapsulado protege una hélice de tres aspas de sentido determinado, pero capaz de intercambiar con otra del sentido opuesto, según sea necesario.

Estos propulsores, se caracterizan por usar una tarjeta controladora electrónica, conocido por sus siglas ESC por su nombre en inglés, la cual recibe una alimentación DC de alta variación de corriente, y una señal del tipo PWM que generalmente está en el rango de 1000 a 2000 microsegundos o un subrango de éste. El controlador del motor convierte la señal enviada, y la transforma en una carga trifásica de cierta amplitud de corriente, que activa el motor en uno de los dos sentidos posibles, dependiendo del valor dado y genera movimiento en la hélice. Este proceso desprende una gran carga calórica de la tarjeta, y no siempre es suficiente con el disipador que viene instalado, por lo cual muchas tarjetas tienen una protección según la temperatura que alcance la tarjeta.

Debido a que la empresa ya tiene experiencia y confianza en este tipo de propulsión se pidió su uso para este proyecto, pues demostrado reducir las necesidades de mantenimiento al ser motores sin escobillas, así como un buen desempeño en embarcaciones de esta envergadura. Por lo tanto, para la selección de los propulsores es necesario concebir el peso a mover a través de la embarcación.

$$F = m * g \quad (2.1)$$

El peso estimado a empujar por los motores se calcula con la sumatoria de masas indicada en la Tabla 2.7, lo que nos da el valor de 70 N aproximadamente. El dron se desplazaría por medio de la acción de dos hélices en direcciones de giro opuestas entre sí, lo cual requiere un motor por

hélice. Cada motor debe ser capaz de mover la mitad de la carga descrita anteriormente, es decir, 35 N.

Actualmente los propulsores submarinos consideran la carga en kilogramos-fuerza, para lo cual se divide de nuevo el peso entre la gravedad, con lo que se obtiene 3.5 kg f de carga por motor. Esto es una pauta preliminar para la selección del propulsor, puesto que se puede sacrificar capacidad por consumos más bajos de batería para aumentar la autonomía del sistema.

Tabla 2.8

Comparación de sistemas de propulsión

MODELO	BLUE ROBOTICS T200	APISQUEEN U2
Imagen		
Carga Nominal (16V)	5.25 (adelante) - 4.1 (reversa) kg f	2.5 (adelante) – 2.32 (reversa) kg f
Corriente Nominal (16 V)	24.375 A	29 (adelante) – 24.5 (reversa) A
Peso en aire (con cable)	344 g (156 g)	90.71 g
Precio	\$ 236.00	\$ 79.98
Ventaja	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor capacidad de carga. • Calidad demostrada por marca. 	Controlador encapsulado para protección en inmersión y disipación de calor con agua. Menor precio.

Se ha escogido el propulsor BlueRobotics T200, pues en la Tabla 2.8 se observa que es el motor más eficiente. Además, este propulsor puede ser utilizado en un amplio rango de voltaje,

desde los 7 hasta los 20 V, lo que representa una gran flexibilidad para la posterior selección de la alimentación eléctrica.

2.7.2 *Cálculo y selección de alimentación eléctrica*

En primer lugar, se calcula el consumo de energía con los principales componentes eléctricos ya seleccionados. Estos se los puede ver en la

Tabla 2.9 con sus respectivos parámetros de voltaje y corriente. A partir de esta información se calcula la energía consumida por cada elemento con la ecuación (2.2, de esta manera con la suma del consumo de todos los elementos se podrá contabilizar el consumo total del sistema.

En segundo lugar, a partir del voltaje requerido por los diversos componentes, es posible establecer el voltaje mínimo que debería ser capaz de proporcionar la batería. En este caso, ya que los propulsores requieren de 10 V, la batería deberá poder proporcionar al menos este voltaje. Cabe recalcar que es posible usar baterías con un voltaje mayor, y reducirlo a través de un *step-down*, esto permitiría reducir el amperaje necesario de la batería.

$$W_b = V_b * I_b \quad (2.2)$$

$$H = W_b/W_c \quad (2.3)$$

Tabla 2.9

Consumo aproximado de los principales componentes eléctricos

	Corriente estándar	Voltaje trabajo	de Consumo promedio
--	--------------------	-----------------	---------------------

Controlador de navegación	2.5 A	4.8V-5.4V (Confirmado)	14 W
Raspberry Pi 4 conectado a sensores	0.85 A	5V	4.25 W
Módulo de Geolocalización	0.15 A	Mismo voltaje que batería	1.5W
Propulsor(es)	10 A (potencia reducida)	10V	100 W (x2)
Total	13.5 A		220 W

Como tercer paso, al tener un consumo aproximado de 220 W y haciendo una igualación entre la ecuación (2.2 y (2.3 se obtiene que, para alcanzar los 40 minutos de autonomía, la capacidad de la batería debería ser de al menos 147 W. Y haciendo nuevamente uso de la ecuación (2.2 se puede determinar que, en caso de usar una batería de 12 V, la capacidad de esa debería ser de al menos 12.25 Ah, pero en caso de optar por una batería de 14.8 V bastaría con un valor de 10 Ah.

Figura 2.8

Baterías tipo Li-Po seleccionadas para la embarcación



Finalmente, dentro de las baterías que el cliente puso a disposición, existen dos baterías del tipo que fue preseleccionada, de 14.8 V con 6,500 mAh de capacidad, mostradas en la Figura 2.8. Dada su relativamente baja masa, de 590 g, es posible colocar las dos baterías en la embarcación y conectarlas en paralelo, para alcanzar los 13,000 mAh. Brindando 192 W, que bastarían para más de 50 minutos de autonomía.

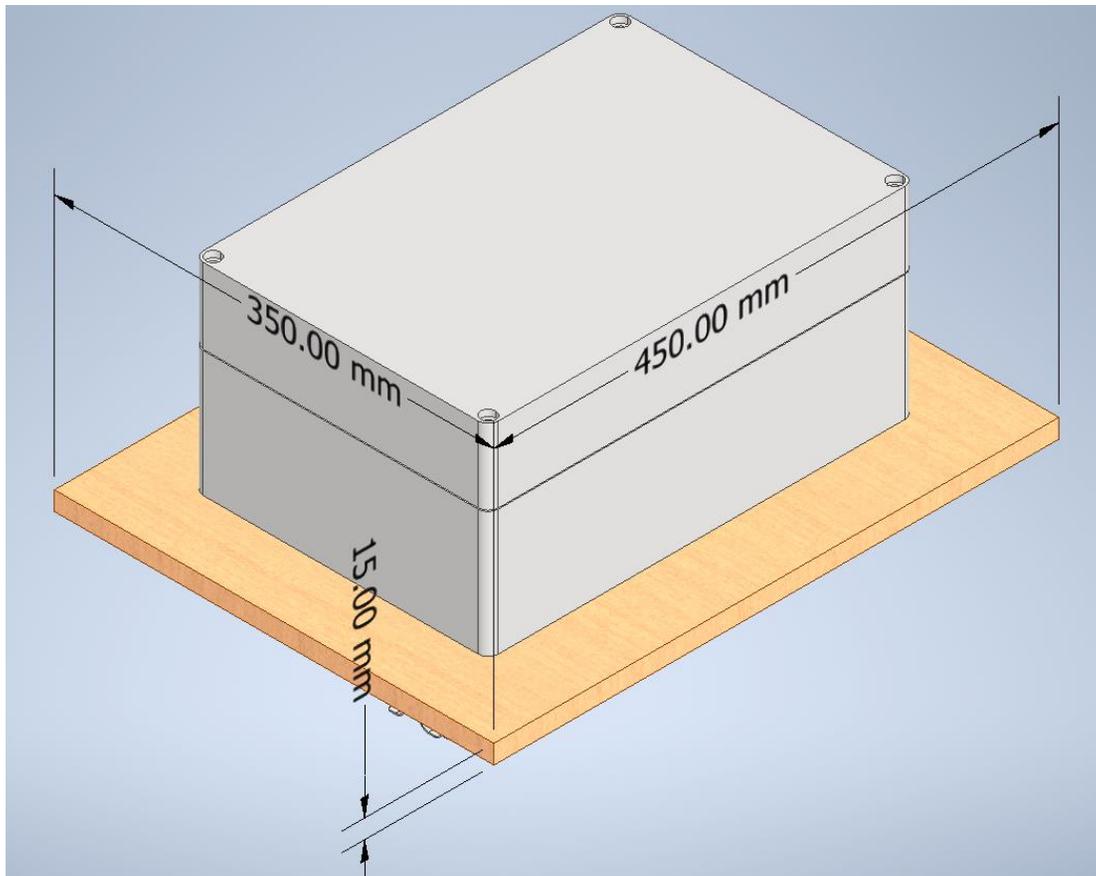
2.7.3 Diseño de plataforma

El primer elemento de la embarcación que va a ser diseñado será la plataforma, pues sus requerimientos son los más sencillos y fundamentales. Esta debe abarcar el *housing* con las dimensiones de la Tabla 2.7, el cual sigue las normas de seguridad IP68 y posee una salida impermeable para cables de conexión. Además de no superar la restricción de 1 m² de superficie,

debe utilizarse un material ligero, el mismo que será balsa, ya que tiene una densidad aproximada de 0.15 g/cm^3 , cabe aclarar que esta plataforma será reforzada por una viga metálica.

Figura 2.9

Plataforma de la embarcación junto con el housing



En la Figura 2.9 se puede observar el *housing* y la plataforma de balsa con sus respectivas medidas. La plataforma se extiende 100 mm con respecto a las medidas del *housing*. El grosor de la plataforma se ha establecido en 15 mm, pues esta será reforzada con una estructura metálica. De esta manera el volumen es de $2,363 \text{ cm}^3$, lo que resulta en una masa de 354 g para la plataforma.

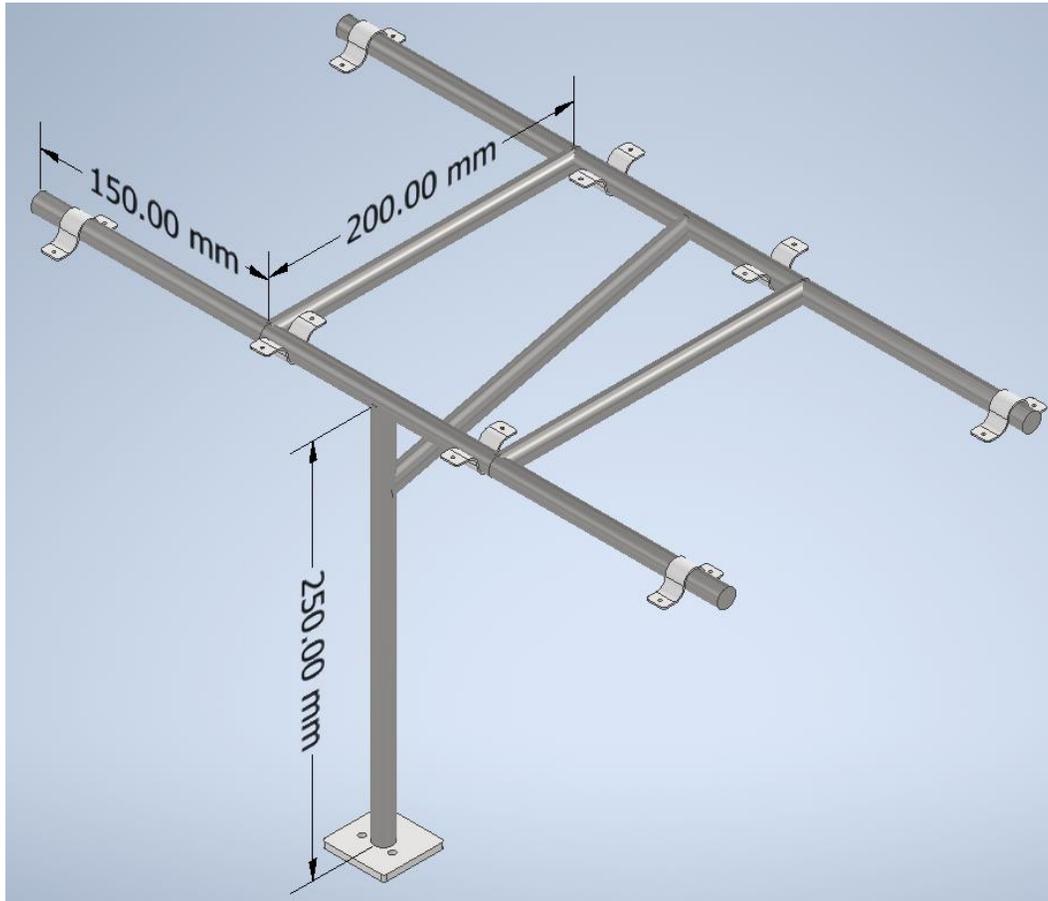
2.7.4 Diseño de esqueleto metálico

Para acoplar la plataforma y los cascos se requiere una estructura sólida, capaz de soportar los esfuerzos a los que estará sometida la embarcación. Una consideración importante para el

diseño de esta estructura es que va a estar en contacto con el agua, por ende, deberá estar protegida contra la corrosión. Además, ya que el sonar, y los sensores de temperatura y concentración de oxígeno disuelto deben estar dentro del agua, es posible usar este esqueleto para sumergirlos.

Figura 2.10

Estructura de soporte para la plataforma



En la Figura 2.10 se observa la estructura metálica, con sus respectivas medidas y abrazaderas. Para el esqueleto se ha escogido barras de acero negro de 12 mm, que otorgan una gran rigidez a la estructura. Los segmentos del esqueleto, así como las abrazaderas deben ir soldadas para asegurar un buen acople entre las piezas. Es por esto que se han preferido barras

sólidas por sobre tuberías, pues de esta manera se evitan inconvenientes al momento de soldar las piezas.

Luego de soldar los distintos elementos, la estructura será pintada para protegerla contra la corrosión. Por último, se evalúa el volumen de la estructura para estimar su masa. Acorde a la densidad de 7.85 g/cm^3 , y el volumen de 199 cm^3 , la masa de la estructura es de $1,563 \text{ g}$.

2.7.5 *Cálculo de empuje necesario para flotar*

Con el objetivo de construir una estructura capaz de navegar en aguas dulces, es necesario calcular el empuje que requiere la embarcación para flotar. El proceso que seguir es usar la masa total del sistema, aproximada en la Tabla 2.10, para a partir de esta evaluar el volumen de agua que la embarcación debe desplazar para poder sustentarse en la superficie de la piscina.

Tabla 2.10

Masa aproximada de los componentes de la embarcación

Componentes	Masa
<i>Housing</i> de fibra de vidrio de IP68 (electrónica)	5 kg
Estructura metálica	1.56 kg
Plataforma	354 g
Total (sin cascos)	6.9 kg

$$E = \rho_{\text{fluido}} \cdot V_{\text{sumergido}} \cdot g \quad (2.4)$$

Por sumatoria de fuerzas en el eje vertical, igualando las ecuaciones (2.1) y (2.4) se puede observar que es necesario desplazar $6,900 \text{ cm}^3$ de agua para sustentar la embarcación. Por otro lado, los cascos a diseñarse aumentarán la masa total del sistema, por lo que será necesario recordar que para sustentar cada kilogramo de masa se requiere desplazar $1,000 \text{ cm}^3$ de agua.

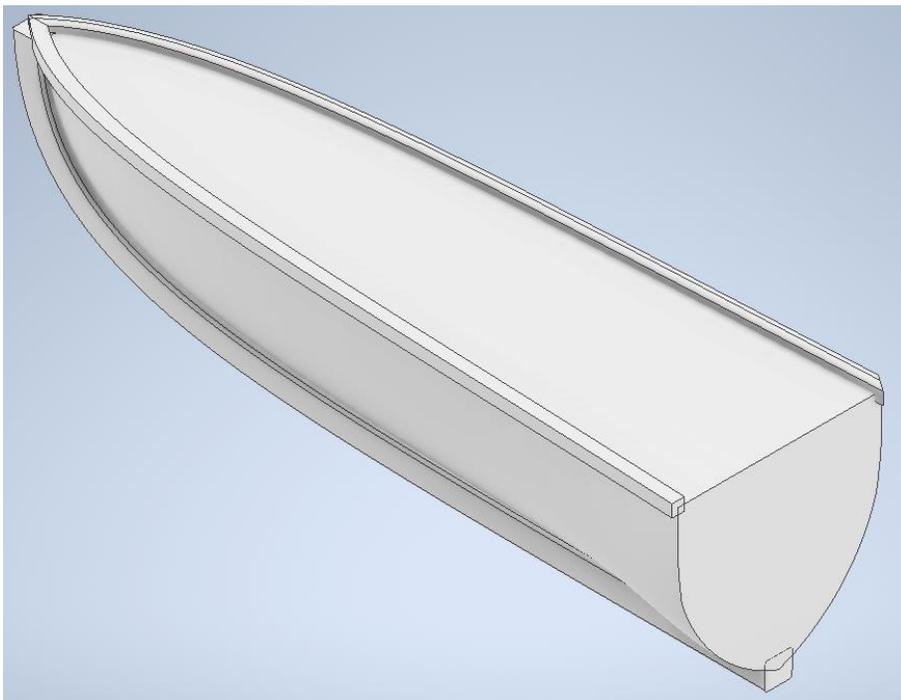
2.7.6 *Diseño de cascos*

A partir del cálculo anterior se conoce que cada uno de los cascos, *hull* por su nombre en inglés, debe desplazar $3,450 \text{ cm}^3$ de agua, más $1,000 \text{ cm}^3$ adicionales por cada kg de masa del propio casco. Para asegurar un diseño ligero, se usará como material base de los cascos poliéster expandido, que tiene una densidad de 0.01 g/cm^3 .

Además, se reforzarán con un recubrimiento de fibra de vidrio MAT 300, que implicará aproximadamente 1 kg por m^2 cubierto. Este material es el predilecto en embarcaciones de este tipo, pues posee una alta resistencia a la corrosión, no se oxida, y es más resistente que el acero.

Figura 2.11

Diseño de cascos de polietileno expandido reforzado por fibra de vidrio

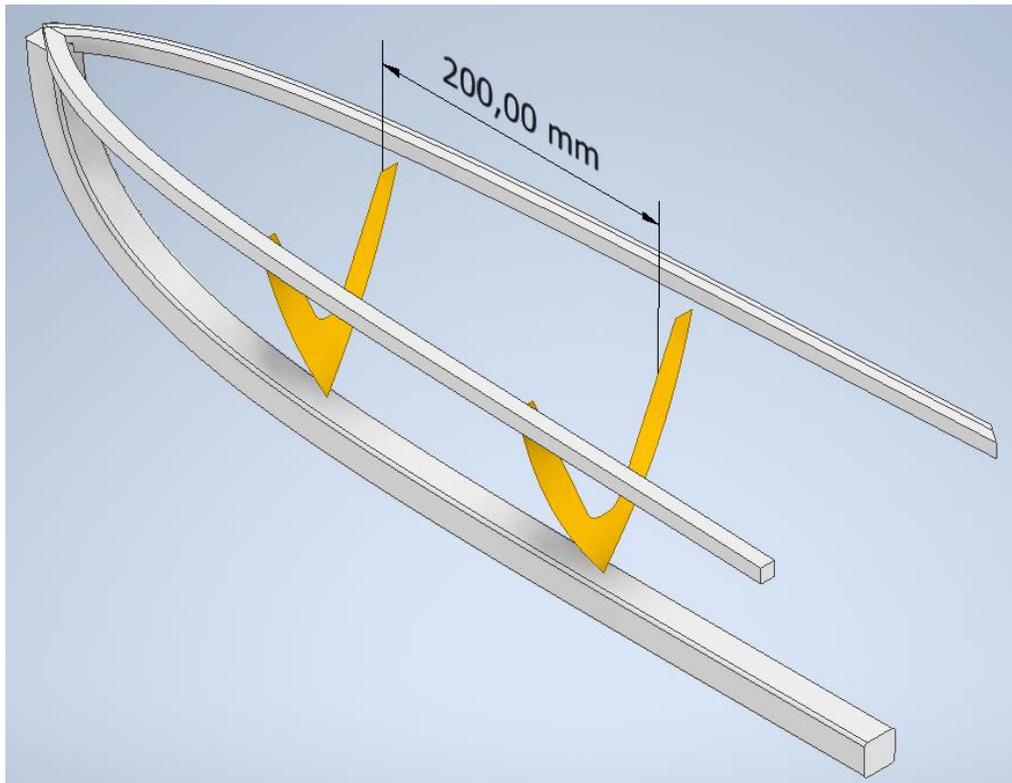


En la Figura 2.11 se muestra el diseño de los cascos, aquí se puede observar que cuentan con dos refuerzos a cada costado en la parte superior, y la quilla en la parte central inferior. Los refuerzos superiores servirán para acoplar la estructura metálica a los cascos. Mientras que la quilla

en la parte inferior será usada para colocar los motores. Estos refuerzos serán de madera de balsa, con densidad de 0.15 g/cm^3 , para darle mayor rigidez a la estructura y poder atornillar de manera ágil los elementos, estos refuerzos son más apreciables en la Figura 2.12.

Figura 2.12

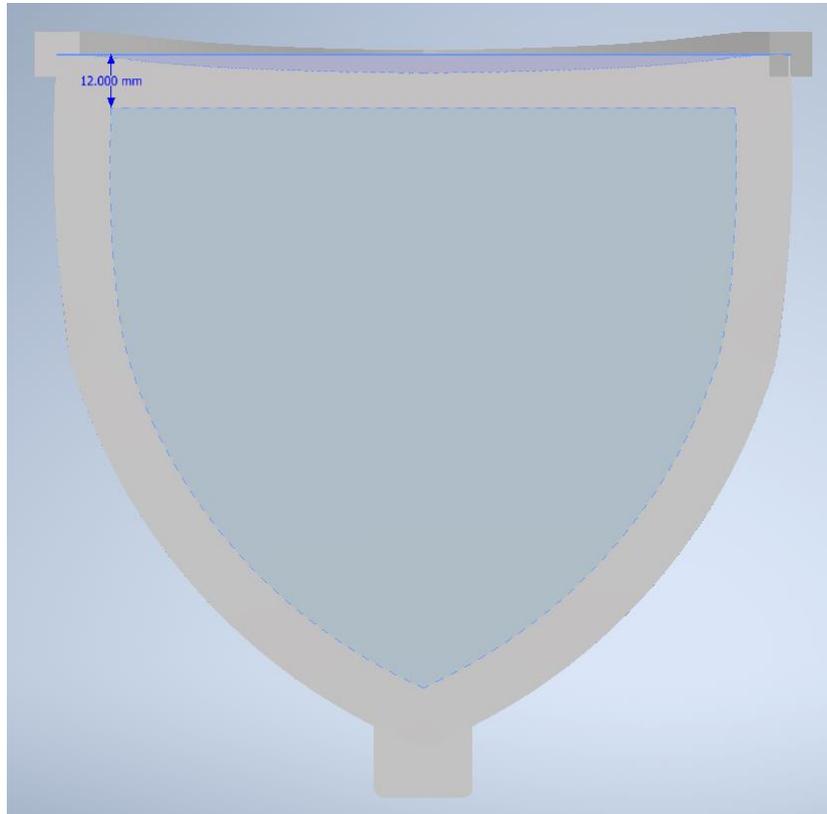
Refuerzo interno de los cascos



Por otro lado, en la Figura 2.12 se observa de color amarillo los refuerzos internos de los cascos. Estos están separados por 200 mm, serán de polietireno expandido con 20 mm de ancho. Se ha escogido este material puesto que su propósito es únicamente precautelar la deflexión y no estarán sometidos a grandes esfuerzos, pues es una embarcación liviana.

Figura 2.13

Perfil posterior del casco con grosor de pared de 12 mm



En la Figura 2.13 se presenta una vista posterior del casco, mostrando el grosor de 12 mm. Esto deriva en un volumen sólido de $1,968 \text{ cm}^3$ entre las paredes del casco y los refuerzos internos, que son aproximadamente 20 g. Además, los refuerzos de balsa tienen un volumen cercano a los 300 cm^3 , lo que equivale a 45 g de madera de balsa. Por último, La fibra de vidrio usada para el refuerzo de los cascos representará menos de 3 gramos en su totalidad.

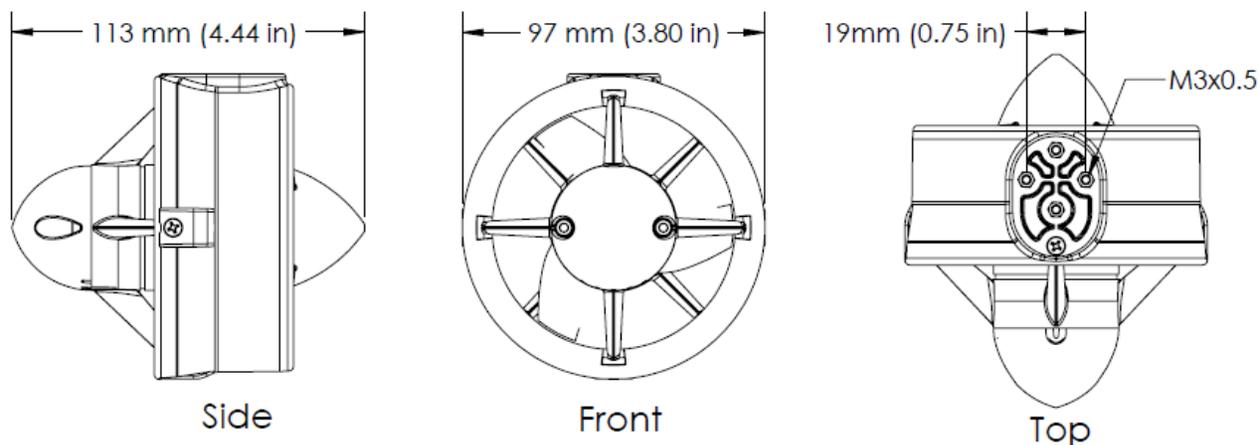
Finalmente, se redonde la masa total de cada casco en 70 g, haciendo una suma total de 140 g entre los dos cascos. Del software de diseño también se obtiene el máximo volumen de agua desplazado de $5,707 \text{ cm}^3$ por casco. Esto representa una capacidad de carga mayor a 11 kg, bastante superior a los 6.9 kg preliminares de la embarcación. En la Tabla 2.11 se desglosan los parámetros de los cascos:

Tabla 2.11*Dimensiones de los cascos*

Dimensión	Valor por casco
Largo	607 mm
Ancho	170 mm
Alto	171 mm
Espesor de pared	12 mm
Superficie total	2,811 cm ²
Volumen desplazado	5,707 cm ³
Volumen sólido exterior	1,808 cm ³
Volumen sólido refuerzos internos	160 cm ³
Volumen quilla y refuerzos de balsa	300 cm ³
Masa total	70 g

2.7.7 Acople y posicionamiento de propulsores

Una vez escogido el sistema de propulsión y diseñados los cascos, se debe identificar la posición más adecuada para colocar los propulsores a la embarcación. Dado que el dron contará con dos propulsores, cada uno de estos irá a un casco. Los propulsores escogidos cuentan con bases atornillables para una fácil integración que se visualizan en la Figura 2.14, por tal motivo el refuerzo inferior de los cascos ha sido diseñado considerando esto, y permitirá un fácil acople.

Figura 2.14*Medidas de la base del propulsor [26]*

2.8 Sistema de control

En esta sección se encuentra tanto la selección del módulo de procesamiento de datos, luego la implementación de la programación en este módulo, la configuración del software de control y finalmente el uso de información para mostrarla en el software de visualización de datos.

En primer lugar, se procede a realizar el análisis de selección de un módulo adecuado para manejar los datos según los requisitos y limitaciones del entorno húmedo donde se va a trabajar. En segundo lugar, se realizará una preselección de los sensores en base al cumplimiento de los rangos necesarios y demás requerimientos. Finalmente, se hará la selección final en base a una tabla comparativa entre las opciones preseleccionada.

2.8.1 Selección de módulo computacional para procesar los datos

Para poder monitorizar de manera confiable la biomasa del camarón, existen los siguientes parámetros de selección.

- **Almacenamiento externo: Es necesario que sea capaz de almacenar datos en una memoria externa de fácil acceso.**
- **Conexión inalámbrica: Es importante tener conexión inalámbrica para poder enviar datos luego de cada recorrido sin tener que maniobrar en la carcasa y conectar un cable a la computadora en cuestión.**
- **Resiliencia: Se requiere un computador capaz de aguantar entornos con gran humedad cercana y temperaturas mayores a 50 °C durante tiempos de operación mayor a 3 horas.**

Con estos parámetros en cuestión, se debe seleccionar entre las tarjetas *Arduino Due*, *Expressif ESP32* y *Raspberry Pi 4*. La selección se realiza en base a que son productos que han

sido probados con el sistema de comunicación que maneja el *software* de control del *Cube Orange* llamado MAVLink y se encuentran disponible de manera local.

El problema principal de la primera tarjeta microcontroladoras es que para tener acceso a un almacenamiento externo y conexión inalámbrica se debe usar armaduras u módulos externos, algo que ya tiene incorporado el microordenador del Raspberry Pi 4, quien palidece frente a la tarjeta de Expressif por el espacio que ocupa mas no por el almacenamiento externo.

Tabla 2.12

Selección de módulo de procesamiento

Crterios	Almacenamiento externo	Conexión inalámbrica	Resiliencia	Aciertos
Arduino Due	No	No	Sí	1
Expressif ESP32	No	Sí	Sí	2
Raspberry PI 4	Sí	Sí	Sí	3
Modulo con mayor número de aciertos				Raspberry PI 4

Como se puede apreciar por medio de la Tabla 2.12, la mejor opción para suplir las necesidades de procesamiento de datos nos la entrega el microordenador de Raspberry PI 4, el cual es la opción elegida para este diseño.

2.8.2 Sistema de lectura de datos en módulo de procesamiento

Para la realización de un sistema que comunique el módulo de navegación y el módulo de procesamiento de datos con el fin de obtener información de telemetría, se procede a programar un algoritmo en Python 3.11, el cual requiere de:

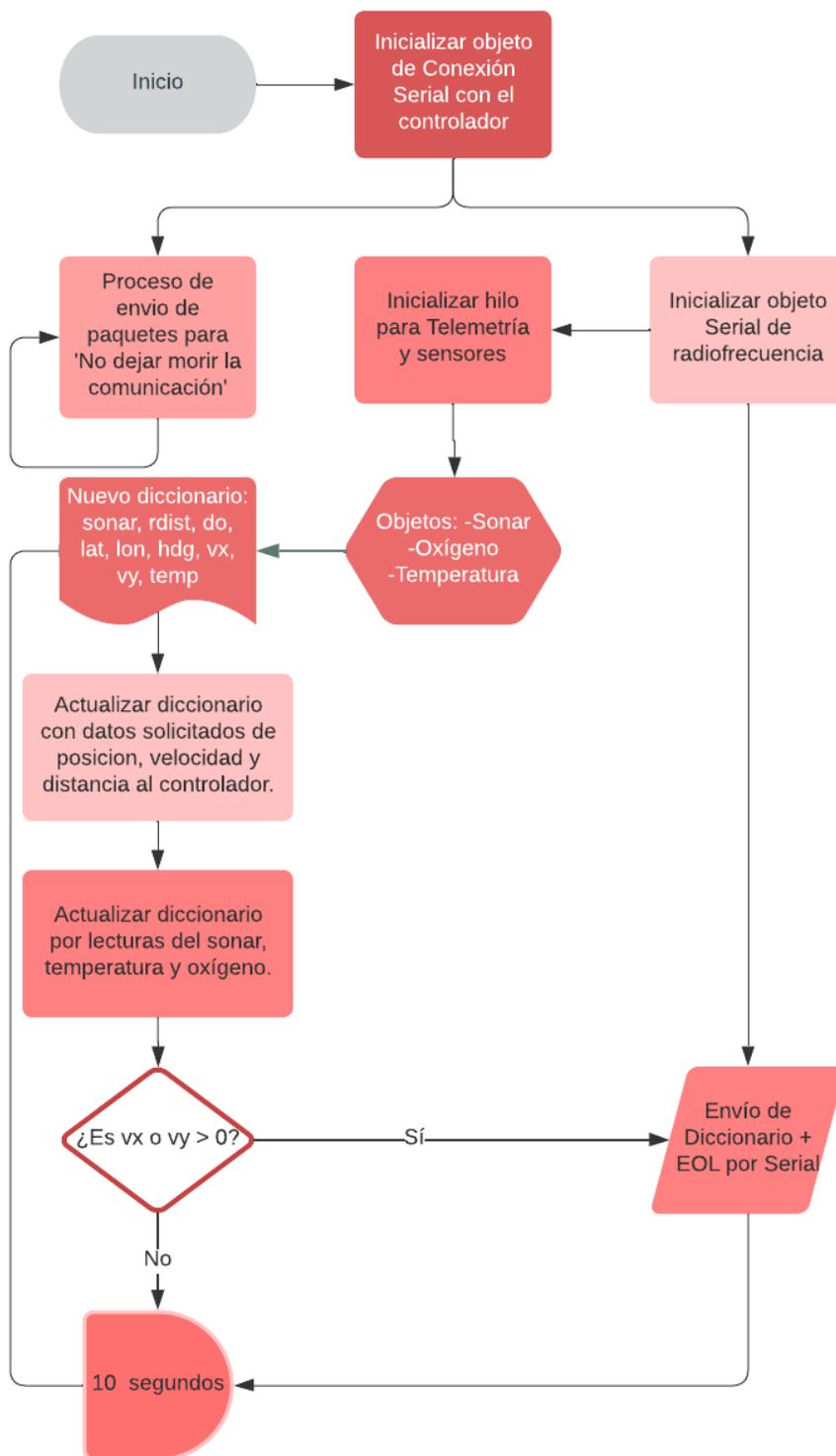
- **Librerías de comunicación MAVLink y conexión serial al control de navegación.**
- **Librería para manejo del sonar y conexión serial.**

- **Conexión serial para el módulo de radiofrecuencia.**
 - **Lectura digital del sensor de temperatura.**
- **Sistema de lectura análogo del sensor de oxígeno disuelto en agua.**

Como es posible visualizar en la Figura 2.15, el sistema de lectura de datos comienza por iniciar los objetos a conexiones respectivas para navegación, sonar, oxígeno disuelto, y temperatura. Luego, en un bucle continuo, lee los datos de estos lugares cada 5 segundos, pero solo envía datos si el dron se encuentra en movimiento.

Figura 2.15

Diagrama de flujo del sistema de lectura de datos en módulo de procesamiento



2.8.3 *Análisis y visualización de mapeado y monitoreo*

Bajo la arquitectura de nodeJS para virtualización de compilación en un entorno local y el uso del lenguaje de programación Javascript para ejecución, la plataforma Node-Red nos ayuda a realizar de forma visual y rápida la programación de un sistema que a partir de la información serial del módulo de radiofrecuencia conectado, se puede calcular los puntos mapeados y la ruta del dron, además del sistema de

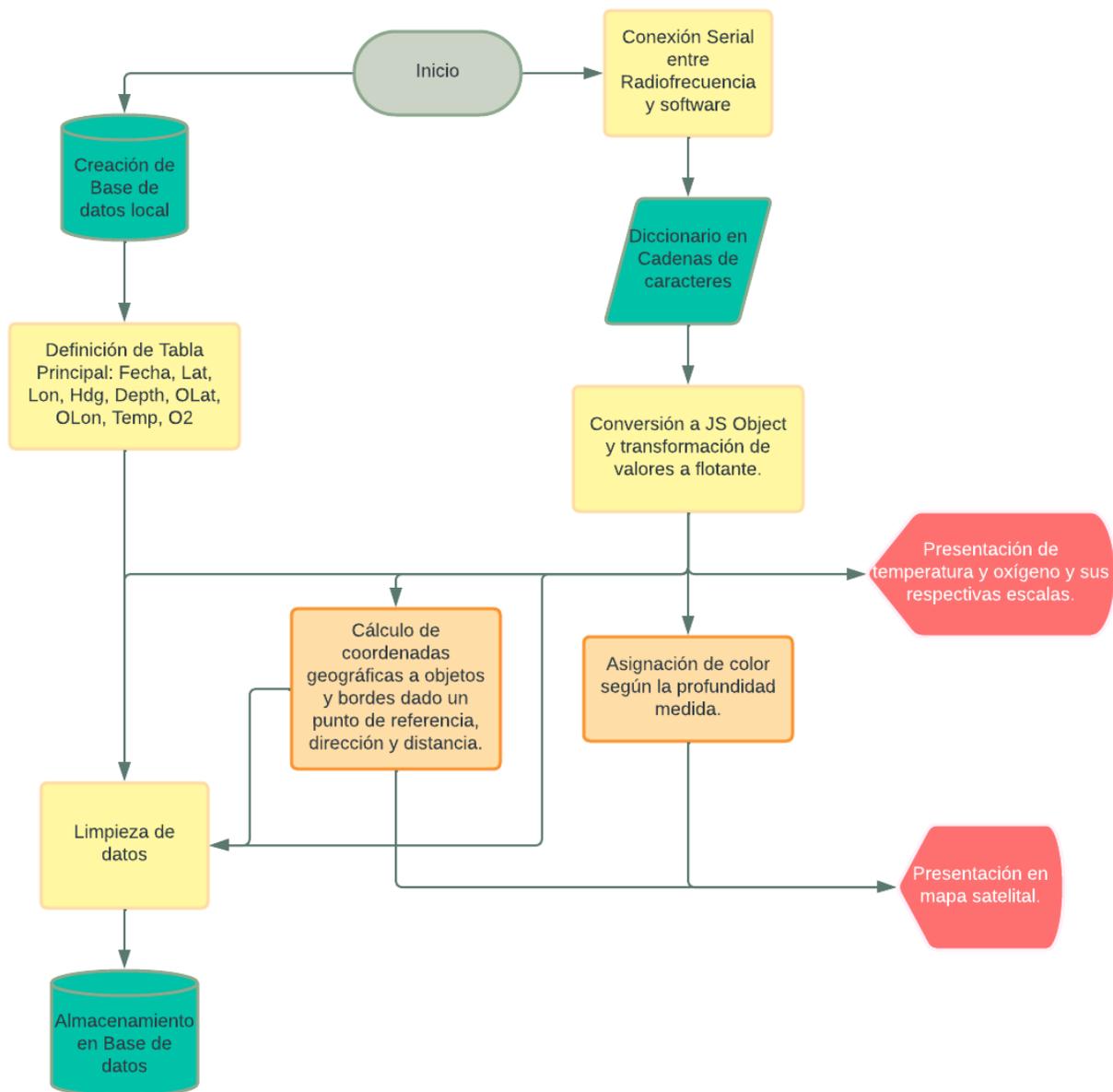
Esta es la lista de requerimientos para tener visualización del mapeado sobre el sistema computacional:

- **Todos los equipos en la embarcación tienen alimentación eléctrica y se ejecutan de manera normal.**
- **El sistema de comunicación entre el módulo de procesamiento de datos y el controlador de navegación se encuentre activo.**
- **Existe alta fidelidad en la señal de comunicación por radiofrecuencia entre el ordenador y el dron acuático.**

Cumplidos estos requisitos, el software de visualización está listo para iniciarse y leer los datos transmitidos, tal y como se muestra en la Figura 2.16.

Figura 2.16

Sistema de visualización de mapeado y monitoreo, con almacenamiento de datos



2.8.4 Configuración de controlador de navegación

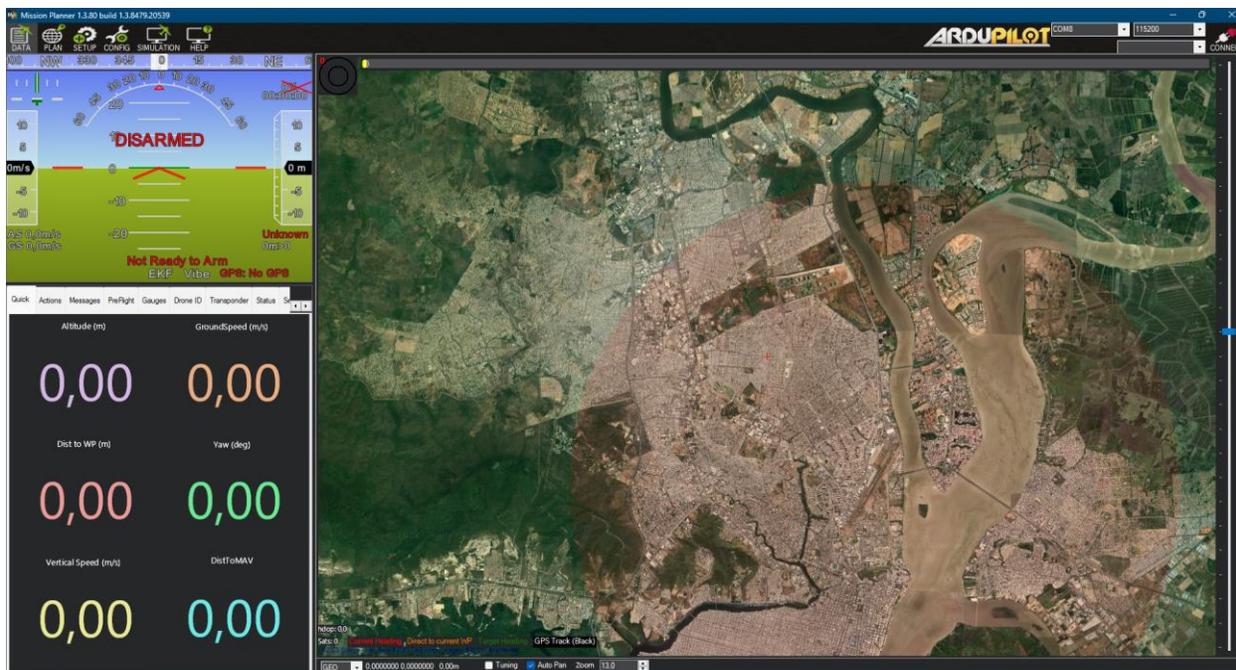
Para este proyecto, se ha tomado en consideración el uso de un módulo de control preestablecido, como es el Cube Orange en su presentación sobre la placa de Pixhawk 2.1, el cual

viene cargado con una versión genérica del firmware de control, llamado Ardupilot. En este punto, es importante entender el que software corre independientemente de los módulos, sensores y actuadores que se le instale al controlador. Sólo requiere suministro eléctrico para iniciarse. El protocolo de comunicación con este software se llama MAVLink. Adicionalmente, el hardware tiene un sistema con triple redundancia de magnetómetro, barómetro, acelerómetro y giroscopio, conjunto conocido como IMU por sus siglas inglesas para Unidad de medición inercial.

El software tiene una gran cantidad de atributos personalizables, en este caso se realizará la configuración del firmware mediante el uso de la aplicación gráfica *Mission Planner* en un ordenador con sistema operativo Windows, que se observa en la Figura 2.17.

Figura 2.17

Aplicación Mission Planner iniciada en pestaña Data



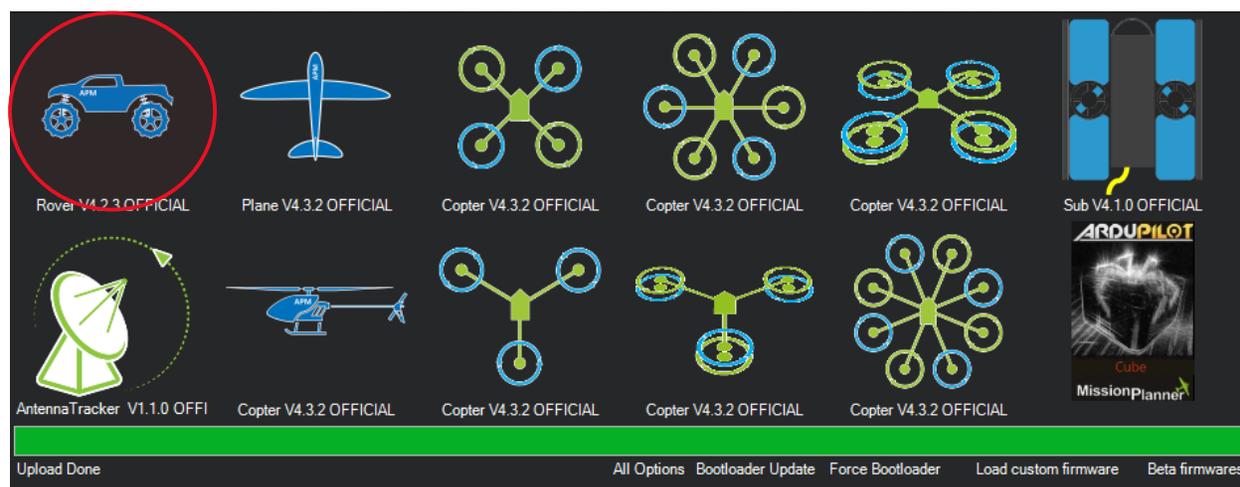
El sistema de control que realiza APM, siglas históricas de Ardupilot, está dado por Algoritmo EKF3, siglas para la versión 3 de *Extended Kalman Filter*, el cual estima la posición, velocidad y orientación angular basada en IMUs, compases, geolocalización, sensores de

velocidad aerodinámica y presión barométrica, y detectores de obstáculos. Adicionalmente, APM permite mejorar el control en la aceleración y giro por varios métodos, entre ellos *Autotuning*, y la detallada configuración de cada módulo externo que se instale en el hardware.

2.8.4.1 Configuración inicial La configuración inicial sobre este software nos va a permitir delimitar el marco de trabajo, o *frame*, para lo cual, se conecta el controlador a la PC por USB y se verifica su identificación por los dos puertos COM habilitados para Cube Orange en el administrador de dispositivos. En la aplicación se dirige a la pestaña *Setup* ubicada en la parte superior, clic en *Install Firmware* y se da clic en el ícono del Rover, como muestra la Figura 2.18. En la ventana que aparece se aceptan por parámetros por defecto y se espera a que la barra verde se llene y debajo salga el mensaje *Upload Done*.

Figura 2.18

Selección del frame a instalar en el controlador



Una vez hecho esto, en la parte superior derecha se selecciona el puerto COM adecuado a MAVLink con la velocidad de transmisión en baudios de 115200, y se da clic en Conectar. Se dirige a la pestaña *Config* en la parte superior y se busca en la derecha el apartado *Full Parameter Tree*. Llegados a este punto, se encuentra una caja de búsqueda en la parte derecha, donde se escribe

FRAME_CLASS y automáticamente busca el atributo. Luego de encontrarlo, se hace clic en este y se cambia su valor por el número 2, como se muestra en la Figura 2.19. Se guardan los cambios dando clic en el botón *Write parameters* ubicado en la parte derecha.

Figura 2.19

Renglón mostrando el cambio de un parámetro en Mission Planner



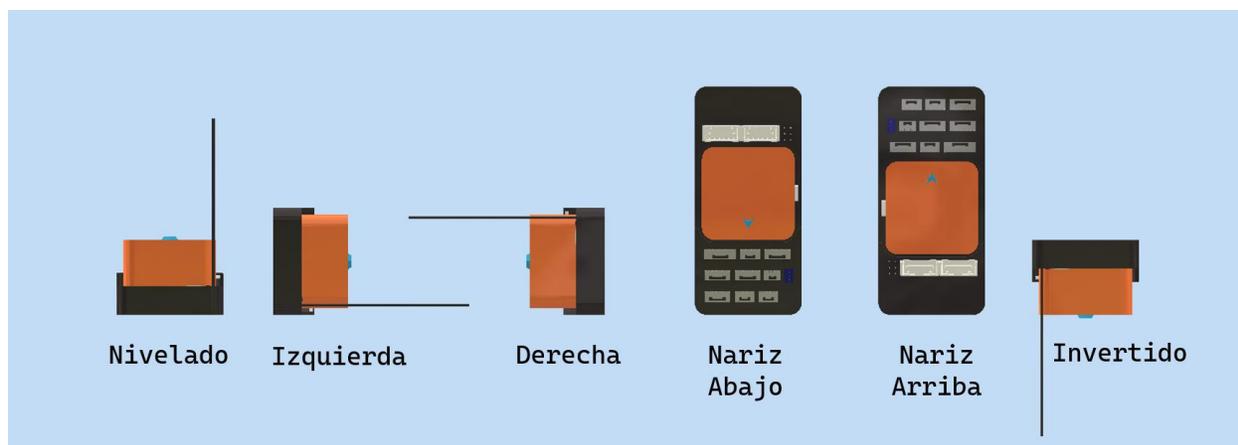
2.8.4.2 Calibración de la geolocalización, IMU y compases Para poder utilizar el sistema de control de APM, es necesario configurar al menos una vez la geolocalización, el acelerómetro y los compases. Adicionalmente, se recomienda configurar el radiocontrol para enviar las señales de aceleración y giro al dron.

En el caso de la geolocalización, solo es necesario habilitar la comunicación con el puerto CAN1 de la placa base del controlador y cambiar al tipo de GPS usado. Para lograr esto, en la sección de *Full Parameter Tree* de la configuración, buscar GPS_TYPE y cambiar el valor a 9. Luego se busca CAN_P1, donde se encuentra el atributo CAN_P1_DRIVER que se debe habilitar tras guardar el cambio del valor a 1.

Para calibrar el acelerómetro, es necesario tener el controlador en la posición de nivel. Luego, se dirige a la subsección *Accel Calibration* en *Mandatory Hardware* de la pestaña *Setup*. Se observan tres opciones, se procede a realizar solo la primera dando clic en ella. En cada paso, se pide que se coloque el controlador en el orden de las posiciones mostradas en la Figura 2.20, cuando se asegure que la posición es la correcta y no haya movimiento, de clic en el mismo botón para avanzar. Una vez finalizado el proceso se da por finalizada la calibración.

Figura 2.20

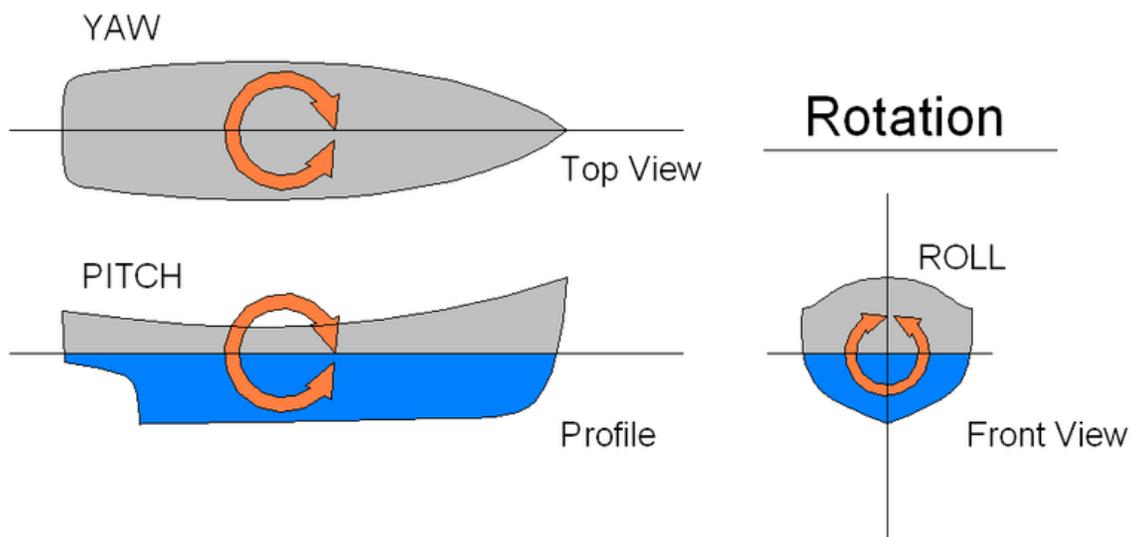
Vista frontal de las posiciones para la calibración del acelerómetro



En el caso de los compases, uno interno y otro externo correspondiente a la geolocalización, se calibran ambos con la interfaz de *Compass* en *Mandatory Hardware* de la pestaña *Setup*. Esta calibración requiere ser realizada en un lugar al aire libre, con buena señal GPS, lejos de campos magnéticos, y como recomendación tanto el controlador como el módulo de navegación deben estar colocados en su sitio final, aunque solo es requerido que ambas puntas de flecha coincidan.

Figura 2.21

Tipos de Giros completos a realizar en la calibración de los compases [27]



Para empezar la calibración se da clic en el botón *Start de la sección Onboard Mag Calibration*. Se debe sujetar el *housing* nivelado en el aire, y rotarlo 360 grados en las direcciones horario y antihorario por cada ángulo náutico: *roll*, *pitch* y *yaw*, como muestra la Figura 2.21. Resulta en 6 vueltas completas más posiblemente algún tiempo y vueltas adicionales para confirmar la calibración o reintentar si no sucede.

2.8.4.3 Configuración para los propulsores

Figura 2.22

Dirección de giro de propulsores para crear avance. Vista frontal



Es importante conocer el funcionamiento de los propulsores para poder coordinar la señal del controlador con la respuesta del propulsor, para lo cual es importante conocer dos factores. En primer lugar, conocer la dirección de giro de cada propulsor de modo que en conjunto muevan en una sola dirección al dron, mostrado en la Figura 2.22 con el CW y el CCW. En segundo lugar, el rango de señal PWM en el cual los propulsores giran normalmente o en reversa, como señala la Tabla 2.13.

Tabla 2.13

Comportamiento del propulsor según el rango de señal PWM

Comportamiento	Tipo de desplazamiento	Max. Throttle PWM	Min. Throttle PWM
Normal	Desplazamiento adelante	1900	1500
Reversa	Desplazamiento hacia atrás	1100	1500

Debido al sistema elegido, *Skid Steering*, la configuración de los propulsores se debe realizar se realiza en la sección de Servo Output en *Mandatory Hardware* de la pestaña *Setup*. Ahí se debe configurar los valores de manera que se deje igual a la Figura 2.23.

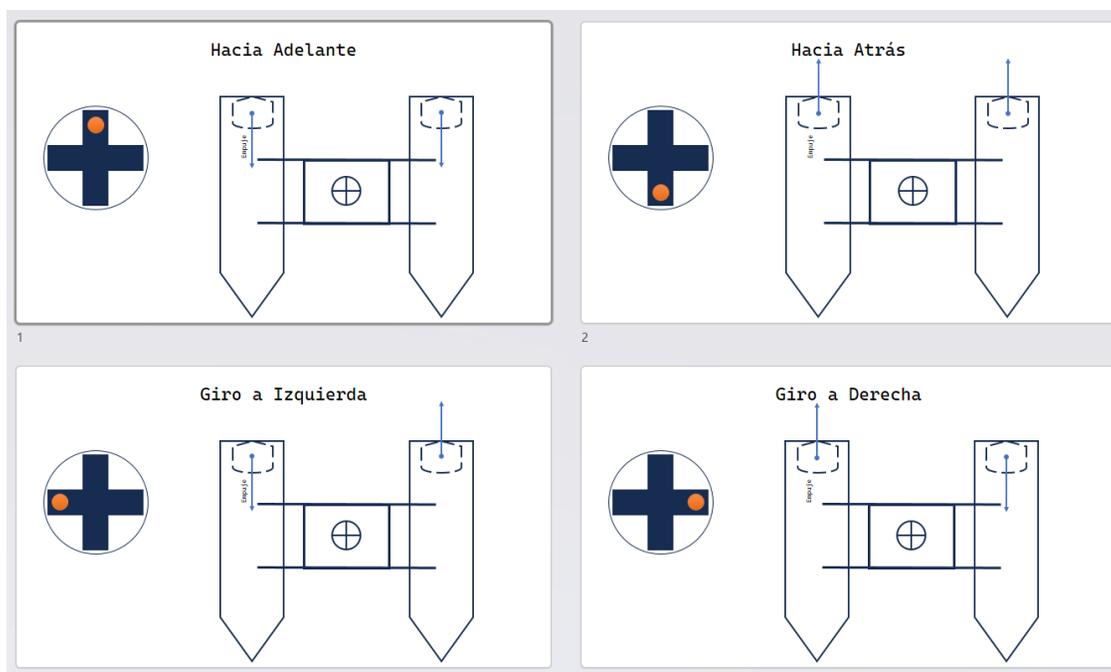
Figura 2.23

Configuración de los Propulsores en Skid Steering

#	Position	Reverse	Function	Min	Trim	Max
1	1500	<input type="checkbox"/>	ThrottleLeft	1100	1500	1900
2	0	<input type="checkbox"/>	Disabled	1100	1500	1900
3	1500	<input type="checkbox"/>	ThrottleRight	1100	1500	1900

Figura 2.24

Maniobras básicas de movimiento y respuesta de los propulsores a la señal PWM



Para facilitar el manejo remoto de este sistema, se puede asemejarlo al sistema de manejo de un automóvil, es decir que la dirección de giro sea la misma sin importa que el vehículo se desplace hacia adelante o hacia atrás, para esto se debe cambiar el valor del atributo `PILOT_STEER_TYPE` a 3. El resultado se aprecia en la Figura 2.24.

2.8.4.4 Mecanismos de seguridad El software tiene métodos defensivos para traer en dron de vuelta a la posición de partida o inhabilitar el movimiento del dron si es necesario. Estos mecanismos por realizar tienen el atributo `FS_ACTION` y se numeran a continuación:

1. **RTL (Return To Launch).**
2. **Hold (Mantener en la posición).**
3. **Intenta SmartRTL (RTL con evasión de obstáculos), si no puede RTL.**
4. **Intenta SmartRTL, si no puede Hold.**
5. **Disarm (Inhabilita el movimiento del vehículo).**

2.8.4.4.1 Radiocontrol Se activa si el valor del canal RC *Throttle* (normalmente el canal RC3) cae por debajo del valor del parámetro FS_THR_VALUE. El atributo FS_THR_ENABLE se cambia a 2 para habilitar y solo continuar las misiones automáticas.

2.8.4.4.2 Batería Se activa en el caso que el valor del batería comparado al configurado en el atributo BATT_LOW_VOLT disminuya más de 10 segundos (dado por BATT_LOW_TIMER), o que la batería consumida sea menor al valor dado por BATT_LOW_MAH, configurado como 20% de la capacidad de la batería, valor que siempre se debe escribir en el atributo BATT_CAPACITY. En cualquier caso, se activa la acción indicada por BATT_FS_LOW_ACT, configurada con el valor 2.

En casos críticos, se puede configurar los atributos BATT_CRT_VOLT, BATT_CRT_MAH para actos críticos, y se recomienda configurar el atributo BATT_FS_CRT_ACT con valor 5.

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

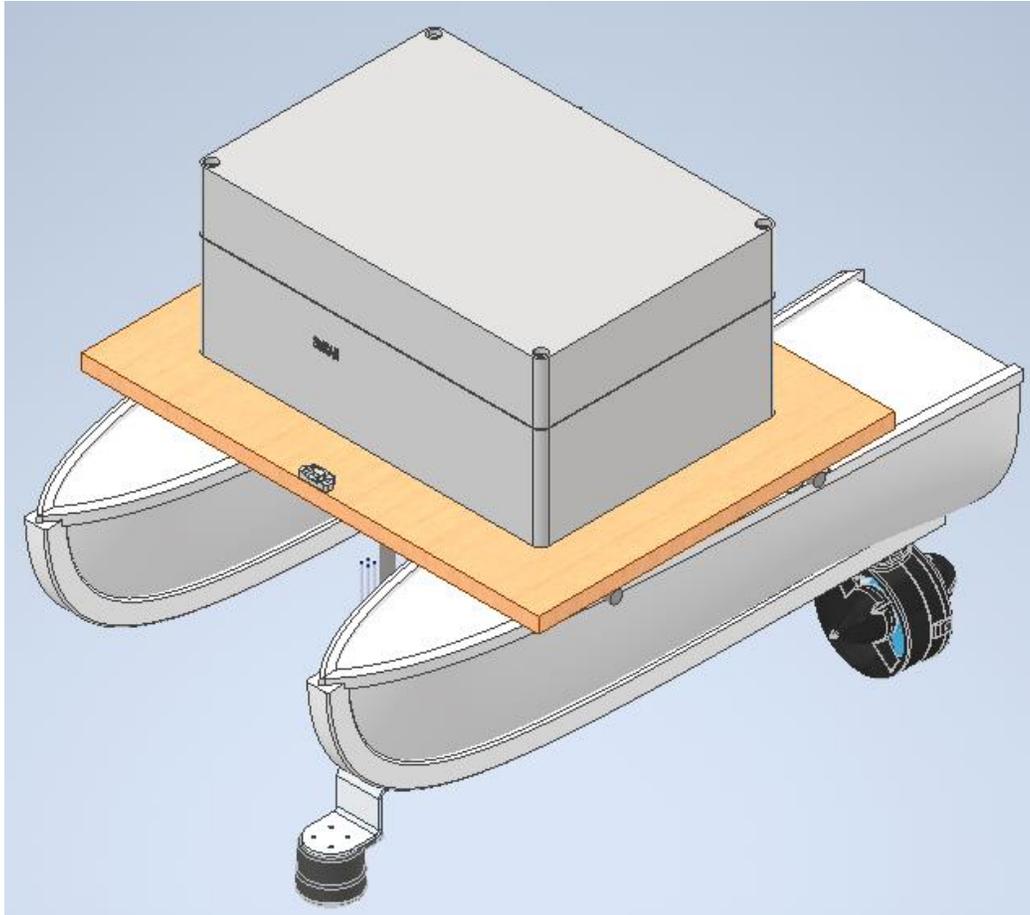
En esta sección se presentan los resultados de pruebas y simulaciones realizadas que permitirán la proyección del funcionamiento del dispositivo, sin necesidad de llegar necesariamente a implementación. De esta manera es posible validar el diseño de los sistemas electrónicos y mecánicos, posibilitando la corrección de posibles puntos de fallo en caso de requerirse.

3.2 Dimensiones de la embarcación

En la Figura 3.1 se presenta la embarcación con todos sus elementos. En la parte superior se observa el *housing* de color gris, este contendrá el controlador, la tarjeta auxiliar y demás electrónicos. Es visible también la plataforma, los cascos, los motores y algunos sensores.

Figura 3.1

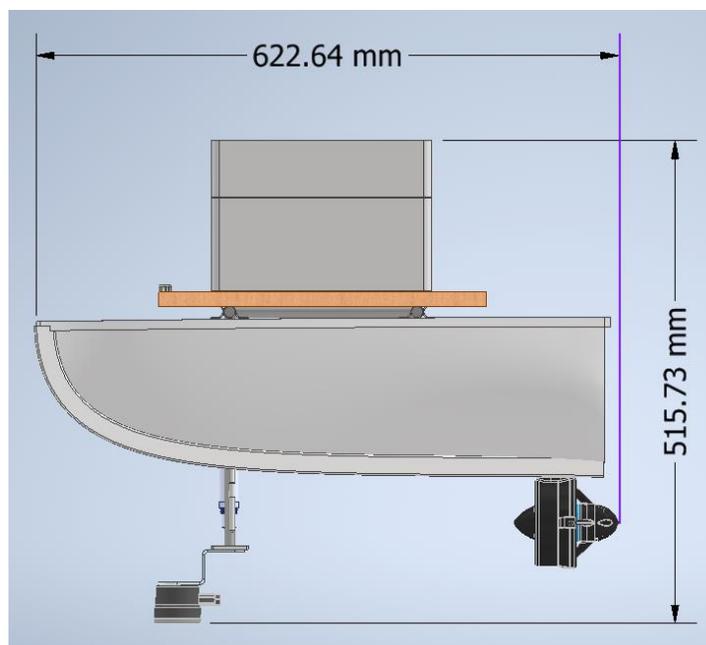
Modelo 3D de la embarcación



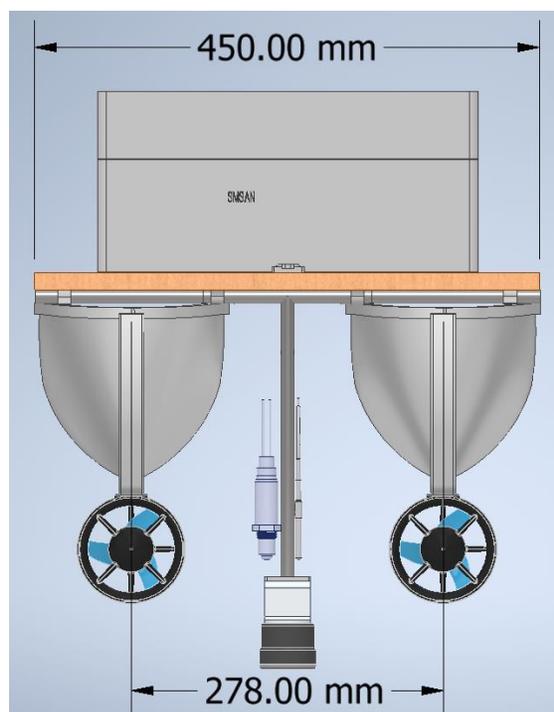
A continuación, se presentan algunas imágenes de referencia con las dimensiones completas de la embarcación.

Figura 3.2

Vista lateral izquierda de la embarcación con medidas de largo y alto

**Figura 3.3**

Vista frontal de la embarcación con medidas de ancho y distancia entre ejes



En las figuras se observa el largo de 623 mm y alto de 516 mm, así también el anco de 450 mm; y la distancia entre los ejes de los propulsores, que es la misma distancia entre los ejes de simetría de los cascos, de 278 mm. Adicionalmente en el apéndice E se presentan los planos del sistema y de sus componentes más relevantes.

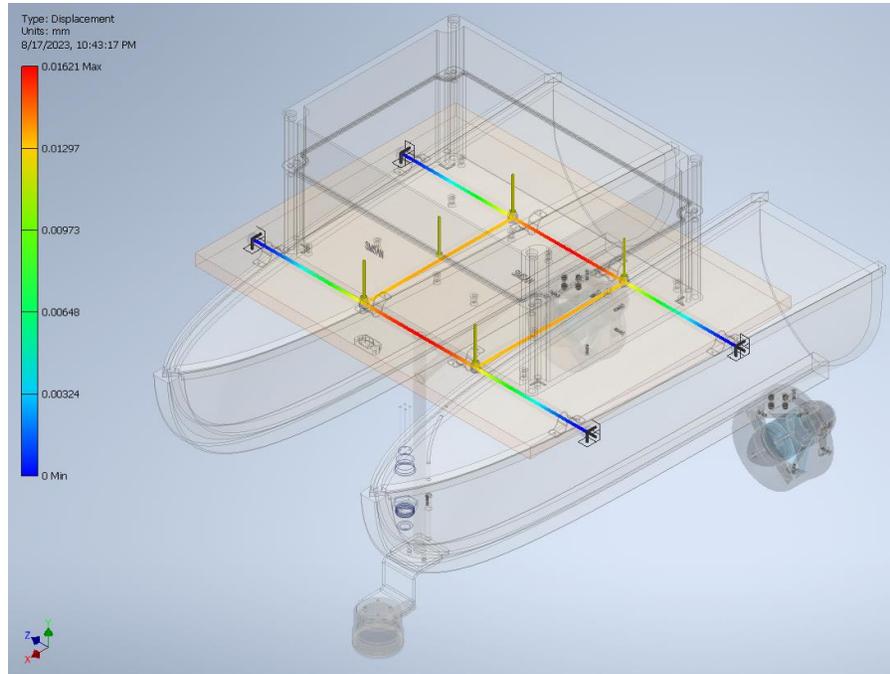
3.3 Análisis de elementos finitos del esqueleto metálico

Para evaluar la fidelidad de la estructura metálica diseñada para la embarcación, esta será sometida a un análisis de elementos finitos. En este caso el fabricante de las varillas de acero indica que el límite de resistencia a la fluencia es de 235MPa. Por lo que resta configurar la simulación.

Se han establecido restricciones totalmente fijas en las abrazaderas de la estructura que van acopladas a un casco, mientras que en las abrazaderas del otro casco se han colocado restricciones en todos los ejes excepto en el transversal al casco. Por último, el peso de la plataforma y el *housing* ha sido representado como 4 fuerzas en los puntos donde se encuentran las abrazaderas para acoplar la plataforma. La suma de las 4 fuerzas representa 10 kg, a pesar de que según las estimaciones deberían menos de 7 kg, esto ha sido usado como un factor de seguridad.

Figura 3.4

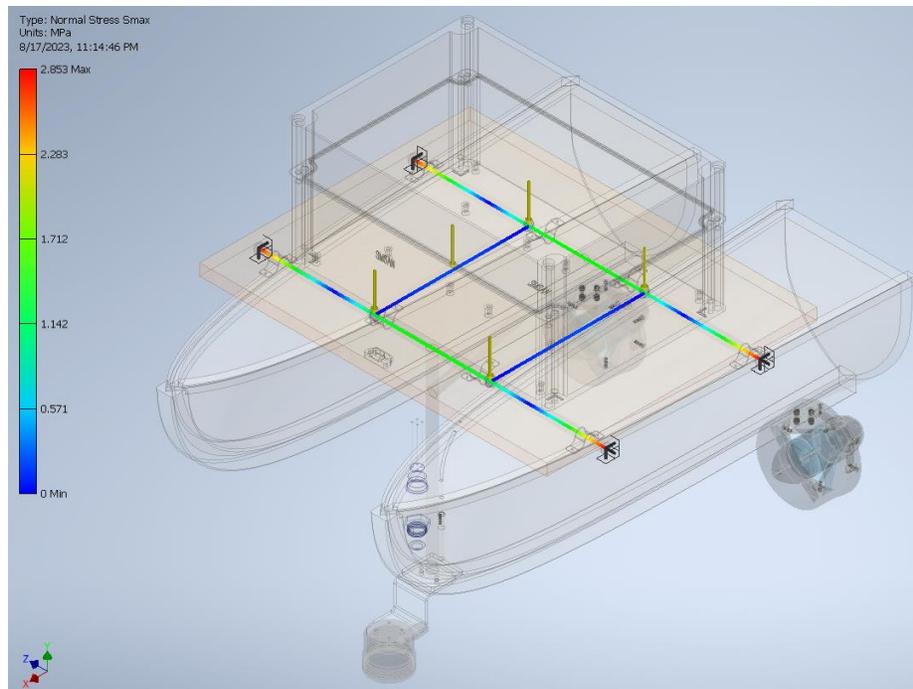
Resultados de deformación de la viga en análisis de elementos finitos



En primer lugar, la Figura 3.4 muestra las deformaciones que sufre la estructura, como se puede observar el máximo desplazamiento es de 0.016 mm. Aunque este desplazamiento es más grande de lo que se espera de estructuras metálicas, este análisis genera esfuerzos más grandes de los que existirán en la implementación real. Pues las fuerzas han sido colocadas en 4 puntos, mientras que en la implementación real el peso estará distribuido de manera más uniforme, pero de todas formas esta es una deformación aceptable.

Figura 3.5

Resultados de esfuerzo normal máximo en el análisis de elementos finitos



En último lugar, se observa el esfuerzo normal máximo en la Figura 3.5 a través de toda la estructura. En la escala es observable que el máximo esfuerzo es de 2.85 MPa, y si se aplica la teoría de energía de distorsión basta dividir este esfuerzo normal máximo, para el límite de fluencia indicado por el fabricante de 235 MPa. De esta manera se obtiene un factor de seguridad de 82, algo extremadamente alto, que asegura el buen comportamiento aún en condiciones de fatiga.

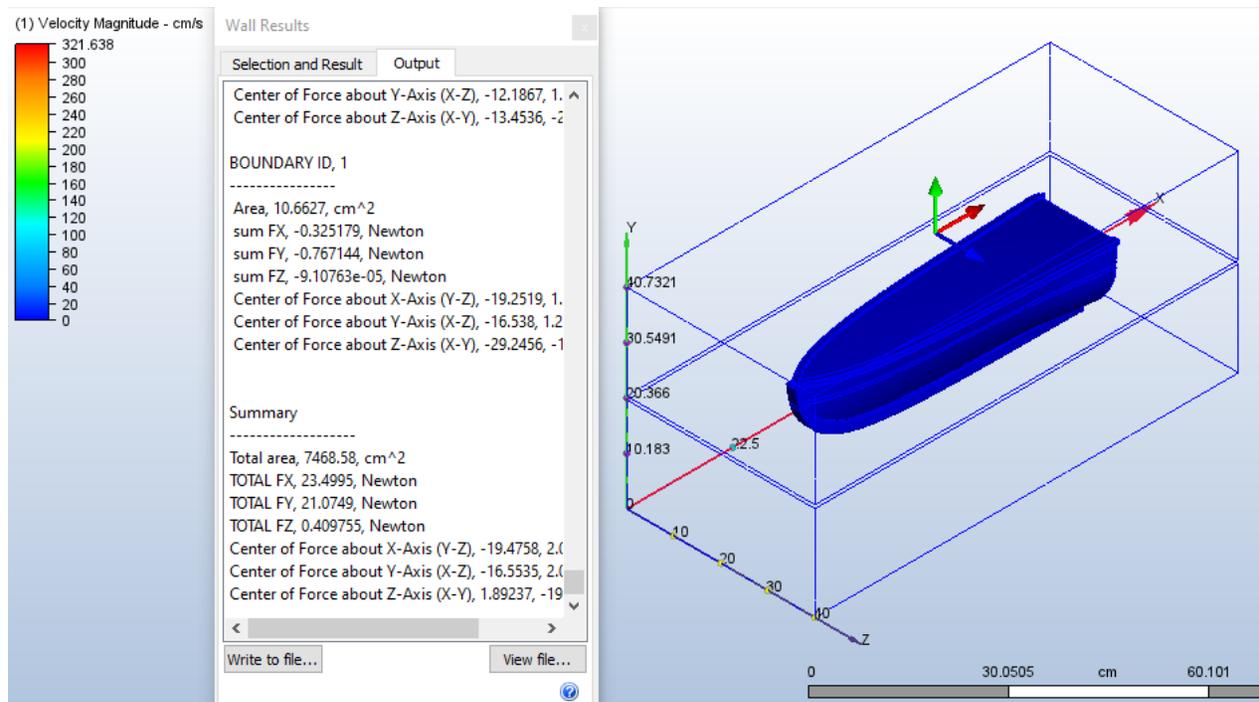
3.4 Estimación de velocidad máxima con simulación CFD

Durante la navegación en las piscinas camaroneras, la embarcación se enfrenta a fuerzas de rozamiento. Para identificar la velocidad máxima de la embarcación basta con que la fuerza suministrada por los motores esté en equilibrio con las fuerzas de fricción que se generan con el agua y el aire. Estas fuerzas se pueden estimar en simulaciones con software CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*). Para simplificar la simulación por su alto costo computacional,

se ha determinado evaluar únicamente las fuerzas sobre el casco y multiplicar la fuerza de oposición al avance por un factor de 1.5 que se ha determinado en el apéndice D.

Figura 3.6

Simulación CFD del casco a 2 m/s

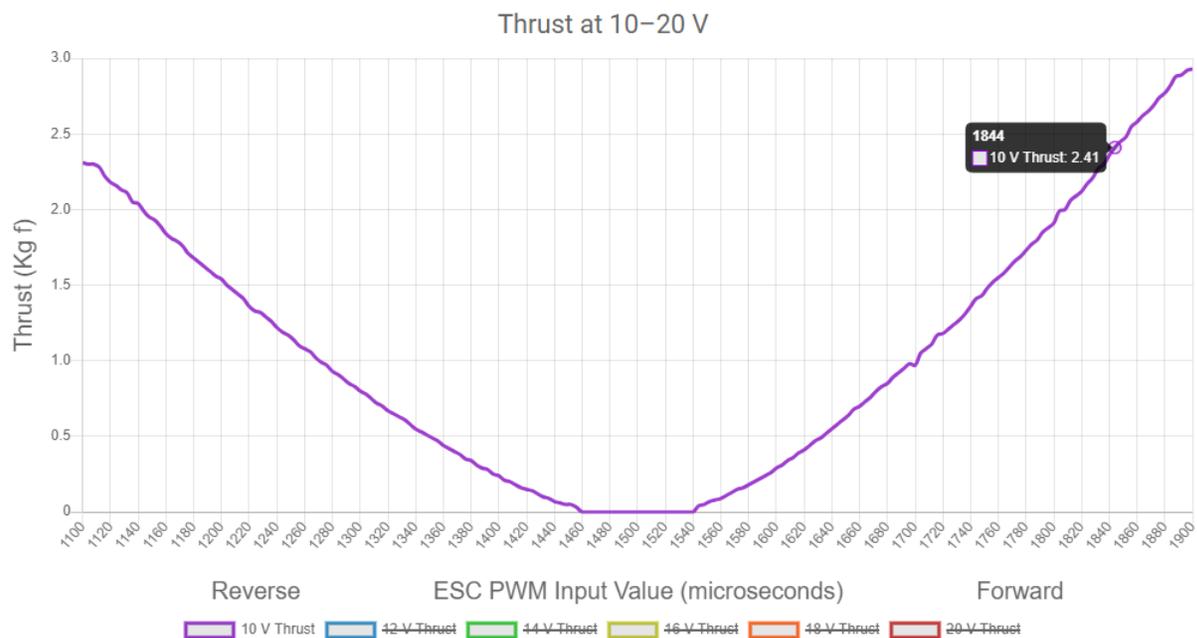


$$F_m = 1.5F_x \quad (3.1)$$

Para hacer uso de la ecuación 3.2 se requiere también de la fuerza que será suministrada por los motores. Ya que cada casco cuenta con un motor, la evaluación será realizada respecto a un motor y a las fuerzas a las que se somete un solo casco. A partir de la información presentada por el fabricante en la Figura 3.7, y con los parámetros de funcionamiento del motor preseleccionados de 10 A y 10 V, se obtiene la fuerza suministrada por el motor de 2.41 Kg fuerza, lo que equivale a 23.64 N.

Figura 3.7

Gráfica de fuerza suministrada por el motor [28]



Así pues, se observa que la fuerza F_x de la Figura 3.6 es de 23.5 N sin usar la compensación, por lo que se puede concluir que la velocidad máxima será menor a los 2 m/s. En el apéndice D se muestra que, aun usando la compensación, la fuerza de oposición al avance a los 1.5 m/s es menor a la fuerza entregada por el motor. Esto implica que para mantener una velocidad de 1.5 m/s, algo común entre los drones acuáticos de mayor categoría, se requiere una corriente inferior a los 10 A previamente estimados.

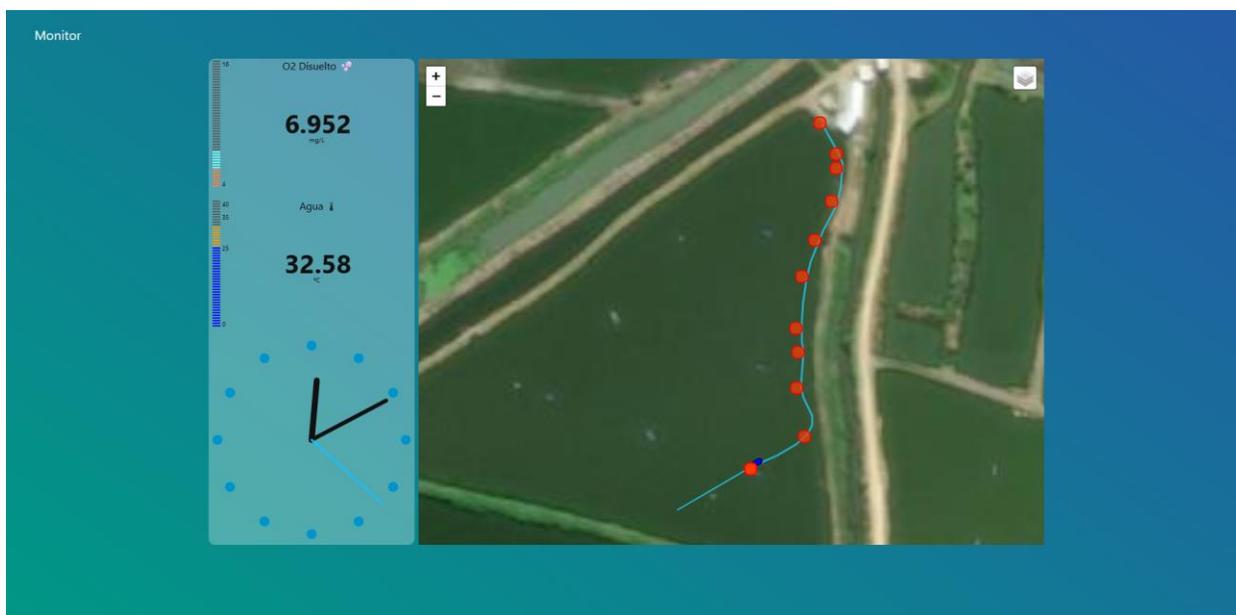
De esta manera se ha determinado apropiado definir 1.5 m/s como la velocidad máxima del sistema, ya que es una velocidad alcanzable según las simulaciones realizadas. Estas simulaciones también aseguran alcanzar las estimaciones de autonomía de la embarcación, ya que mantener la velocidad máxima definida, implica un consumo energético menor al usado en los cálculos de la sección 2.7.2.

3.5 Simulación de mapeado y monitorización.

Como se muestra en la Figura 3.8 el sistema de visualización es capaz de obtener datos a través de la comunicación serial con el módulo receptor de radiofrecuencia, bajo el cual se descifran los parámetros enviados en formato JSON desde el módulo de procesamiento de datos.

Figura 3.8

Interfaz de visualización de resultados



La interfaz que se muestra tiene la ventaja de ser fácilmente reconocible para visualizar los datos esperados. En la caja izquierda se puede observar la última medición de O2 disuelto, la temperatura del agua. Mientras tanto, el mapa que se encuentra en la parte derecha es capaz de representar la trayectoria que recorre el dron, y nos permite observar los puntos rojos que representan un borde de piscina o un objeto con el cual puede chocar el dron. Adicionalmente, como se muestra en la Figura 3.9, se ha desarrollado un sistema de visualización basado en intensidad para observar la profundidad del agua sobre la cual navega el dron en cuestión.

Figura 3.9

Sistema en desarrollo de visualización para profundidad.



3.6 Análisis de costos

En la Tabla 3.1 se detallan los costos asociados al diseño y desarrollo del proyecto. Ya que el proyecto se ha enfocado en el diseño, mas no en la implementación, hay ciertos costos que han sido aproximados en base a cotizaciones realizadas o productos similares. Con respecto a productos cotizados en el exterior, estos han sido cotizados con precios en Estados Unidos de América, por lo que su costo en esta tabla ha sido aumentado en un 50% o más para aproximar el valor total incluidas tasas aduaneras y arancelarias. Adicionalmente, cada componente tiene un hipervínculo a la página referencial del producto, en la medida de los posible.

Tabla 3.1*Desglose del costo del proyecto*

Componente	Precio U.	Cant.	Precio T.	Descripción
Controlador Cube Orange	\$450.00	1	\$450.00	Tarjeta Controladora con sensores IMU, barómetro y compás interno
Kit baterías batería 4S LiPo 14.8V 6500mAh 60C	\$150.00	1	\$150.00	Dos baterías de 14.8 V y 13,000 mAh en total
Matek PDB-HEX Placa de distribución de alimentación	\$45.00	1	\$45.00	Placa de distribución de alimentación
BLUE ROBOTICS T200	\$300	2	\$600	Motores sin escobillas
Radiolink T8S RC Remote and Controller Built-in	\$84.99	1	\$84.99	Radiocontrol ligero de larga distancia con transmisor y receptor
ST VL53L1X Lidar	\$24.99	2	\$29.98	Sensor de distancia LiDAR
Ping2 Sonar Altimeter and Echosounder	\$435.00	1	\$435.00	Ecosonido y Altímetro acuático
PMW3901 Optical Flow Sensor	\$30.00	2	\$60.00	Sensor de Movimiento óptico
HerePro Módulo de geolocalización GPS	\$1,500.00	1	\$1,500.00	Módulo de geolocalización GPS, GNSS
Tarjeta microSD 64GB	\$8.00	1	\$8.00	Almacenamiento externo
RASPBERRY PI 4 B 2GB	\$84.99	1	\$84.99	Microordenador
Gikfun DS18B20 Sensor de temperatura digital	\$13.48	1	\$13.48	Sensor de temperatura de -55 a 270 grados
DfRobot sensor análogo de oxígeno disuelto	\$280.00	1	\$280.00	Sensor de Oxígeno disuelto en agua
Cajetin eléctrico	\$20.00	1	\$20.00	Caja de plástico 250x350 mm
Casco de fibra de vidrio	\$150.00	2	\$300.00	Cascos navieros
Plataforma de balsa	\$15.00	1	\$15.00	Plancha 350x250x15 mm de balsa
Varillas 12mm de acero negro 12m	\$20.00	1	\$20.00	Varilla de 12mm para construcción de armadura
Soldadura	\$30.00	1	\$30.00	Soldadura de armadura
Costo de ingeniería	\$1,000.00	2	\$2,000.00	Mano de obra
TOTAL			\$6,126.37	

Se contabilizaron también valores por mano de obra tanto en el diseño como en la soldadura de la armadura. Todos los precios son referenciados al 6 de septiembre del 2023 en dólares americanos. Cabe aclarar que esto es el costo del prototipo, por lo que los precios son dados por unidad, en caso de realizar compras por lotes se podrían reducir costos.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.2 Conclusiones

- Se ha diseñado una embarcación relativamente pequeña, con dimensiones de 625x450x520 mm, algo apropiado para las piscinas de camarones y que permite una ágil transportación gracias a su diseño compacto.
- Se ha diseñado un sistema modular, que cuenta con los circuitos de control y navegación, y los de monitoreo, que permiten una independencia de las tareas.
- La embarcación es apropiada para condiciones de humedad constante durante 1 hora gracias a la alimentación de 2 baterías LiPo de 6500 mAh de capacidad en paralelo, y a los materiales seleccionados para su construcción como, compuestos de fibra de vidrio, madera de balsa, y piezas de acero negro recubierto, junto al enclaustramiento para los componentes electrónicos de grado IP67 y la selección de sensores con capacidad de inmersión.
- El dron acuático está planeado para realizar acciones motrices con gran destreza, debido a su diseño hidrodinámico, con una velocidad de 1.5 m/s en avance. Junto a esto, se incluye un sistema de detección de obstáculos procesado través de controlador para que no exista peligro a la hora de navegar.
- La visualización de los datos puede realizarse desde un ordenador con alta latencia de internet y un receptor de radiofrecuencia, el cual nos permite tomar los datos procesados de los sensores y del control de navegación para mostrar la trayectoria del dron y los valores obtenidos del agua.

4.3 Recomendaciones

- Dentro del sistema de propulsión es recomendable mejorar el manejo de temperatura para el *encoder* ESC, debido al alto consumo de corriente que maneja para mover los motores. Gracias al propósito del dron, el uso del agua circundante para la implementación de un intercambiador de calor es una de posibles opciones en este caso, siempre y cuando se pueda constatar que, tanto la temperatura de medición no se vea afectada, como que el calor transferido no afecte la producción de los camarones.
- En el sistema de comunicación por radiofrecuencia es posible adaptarse para poder realizar en un futuro rutas automáticas desde el ordenador a través de la interfaz mostrada. Bajo este contexto, es deseable cumplir dos condiciones: la adaptación del sistema de radiofrecuencia a una torre de comunicación para mejorar el alcance de este, y ampliar el sistema de sensores periféricos para detectar obstáculos, ya que la comprobación visual no sería posible.
- Existen diversas formas de abordar el diseño de sistemas para mapeo y monitoreo de piscinas de acuicultura, por lo cual se recomienda explorar otras opciones tales como la compra de casco en lugar de su diseño, de tal forma que se logren reducir los costos del diseño presentado. En este sentido, se propone la inclusión de personal con mayor experiencia en la industria, de manera que pueda proporcionar retroalimentación oportuna que optimice los recursos empleados en el presente proyecto.

Referencias

- [1] Diario EL UNIVERSO, "Ecuador ratificó, en la Feria Organic Food & Eco Living Iberia 2023, su posición como primer exportador de productos orgánicos hacia la UE," 12 Junio 2023. [En línea]. Available: <http://www.camae.org/ecuador/ecuador-ratifico-en-la-feria-organic-food-eco-living-iberia-2023-su-posicion-como-primer-exportador-de-productos-organicos-hacia-la-ue/>. [Último acceso: 16 Junio 2023].
- [2] CAMAE, "Proceso de producción del camarón ecuatoriano continúa atrayendo a compradores y proveedores internacionales," 15 Junio 2023. [En línea]. Available: <http://www.camae.org/industria-camaronera/proceso-de-produccion-del-camaron-ecuatoriano-continua-atrayendo-a-compradores-y-proveedores-internacionales/>. [Último acceso: 16 Junio 2023].
- [3] Estadística Cía. Ltda., "Estadísticas CNA de diciembre 2022," Cámara Nacional de Acuicultura, Guayaquil, Ecuador, 2022.
- [4] C. T. M. E. O. C. M. P. y C. M. P. José Cisneros, "Aplicación de insumos calcáreos y sus efectos en piscinas acuícolas," *Panorama acuícola*, vol. 27, 2022.
- [5] J. Alpuche, A. Pereyra y C. Agundis, Respuestas bioquímicas de camarones marinos a factores ambientales," *Revista Electrónica de Veterinaria*, pp. 1-10, 5 mayo 2005.
- [6] D. H. Peter Duncan, "Effect of high water temperature on the survival, moulting and food consumption of *Penaeus* (Marsupenaeus)," *Aquaculture Research*, vol. 32, nº 4, pp. 305-313, 2001.

- [7] A. A. C. E. B. Hisham A. Abdelrahman, "Influence of variation in water temperature on survival, growth and yield of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* in inland ponds for low-salinity culture," *Aquaculture Research*, vol. 50, n° 2, pp. 658 - 672, 2019.
- [8] A. A. B. C. E. Abdelrahman Hisham A., "Influence of variation in water temperature on survival, growth and yield of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* in inland ponds for low-salinity culture," *Blackwell Publishing Ltd*, vol. 50, n° 2, pp. 658 - 672, 2019.
- [9] R. Mackay, "DeSET mapping boat testing in Okinoshima," 4 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=V8N31A-20fs>. [Último acceso: 15 Junio 2023].
- [10] W. A. Mair, "The Physical Principles of Hovercraft," *The Aeronautical Journal*, vol. 68, n° 646, pp. 683-691, Octubre 1964.
- [11] Buzzer, "Hovercrafts," *Diário de um Dreadnok*, 19 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://dreadnokbuzzer.blogspot.com/2018/06/hovercrafts.html>. [Último acceso: 12 Julio 2023].
- [12] M. e. a. Blauch, "Design of a Twin Hull Based USV with Enhanced Maneuverability," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, n° 33, pp. 1-6, Septiembre 2013.
- [13] PlanetSolar Foundation, "History of Fondation PlanetSolar," PlanetSolar Foundation, [En línea]. Available: <https://www.planetsolar.swiss/en/world-premiere/history/>. [Último acceso: 12 Julio 2023].
- [14] MAN Energy Solutions, "Basic principles of ship propulsion," *PrinfoTrekroner*, Denmark, 2018.

- [15] Ardupilot, "Vectored Thrust," 2023. [En línea]. Available: 1.4.2.2 Hélice con empuje vectorial . [Último acceso: 02 08 2023].
- [16] S. Benjamin, "Experimental Comparison of Skid Steering Vs. Explicit Steering for a Wheeled Mobile Robot," Carnegie Mellon, Pittsburgh, 1999.
- [17] Kevin, "Understanding and Using Scanning Sonars," 1 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://bluerobotics.com/learn/understanding-and-using-scanning-sonars/>. [Último acceso: 29 Junio 2023].
- [18] Jacob, "Ping Echosounder Sonar User Manual," Blue Robotics, 16 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://bluerobotics.com/learn/ping-sonar-technical-guide/>. [Último acceso: 18 Julio 2023].
- [19] MAVLink, "MAVlink Developer Guide.," [En línea]. Available: https://mavlink.io/en/messages/common.html#GLOBAL_POSITION_INT. [Último acceso: 29 Junio 2023].
- [20] P. L. K. W. R.S.S Wu, "Tolerance to, and avoidance of, hypoxia by the penaeid shrimp (*Metapenaeus ensis*)," *Environmental Pollution*, vol. 118, n° 3, pp. 351-355, 2002.
- [21] BlueSensor, "Alimentadores automáticos para camarón Ecuador," BlueSensor, 2021. [En línea]. Available: <https://www.bluesensordata.com/feeder>. [Último acceso: 16 Junio 2023].
- [22] Robotilsa®, "Panorama Acuícola," Panorama Acuícola Magazine, 30 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://panoramaacuicola.com/2023/01/30/robotilsa-alimentadores-automaticos-para-camaron/>. [Último acceso: 16 Junio 2023].
- [23] C. Duke, "Cameroneros del Ecuador y el mundo - Super drone alimentador de camarones," 24 Junio 2019. [En línea]. Available:

- <https://www.facebook.com/groups/263724673807935/posts/1218313308349062/>. [Último acceso: 16 Junio 2023].
- [24] R. Mackay, "DeSET mapping boat in Okinoshima, Japan," 5 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://discuss.ardupilot.org/t/deset-mapping-boat-in-okinoshima-japan/78035>. [Último acceso: 16 Junio 2023].
- [25] Pixhawk4, "Quick Start Cube," 4 Agosto 2019. [En línea]. Available: https://github.com/PX4/PX4-user_guide/blob/main/tr/assembly/quick_start_cube.md. [Último acceso: 28 July 2023].
- [26] BlueRobotics, "T200 Thruster," BlueRobotics, [En línea]. Available: <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>. [Último acceso: 14 8 2023].
- [27] J. Volc, "Three rotational degrees of freedom of a ship or boat," 6 Junio 2006. [En línea]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ARotations.png>. [Último acceso: 17 Agosto 2023].
- [28] Blue Robotics Inc, "Bluerobotics," Blue Robotics Inc., [En línea]. Available: <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>. [Último acceso: 05 09 2023].
- [29] GLOBEFISH, "Ecuador GLOBEFISH Market Profile - 2020," Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [30] L. Zambrano, "Ecuador exporta máquinas para el sector camaronero," 19 Octubre 2022. [En línea]. Available: <http://www.camae.org/camaron/ecuador-exporta-maquinas-para-el-sector-camaronero/>. [Último acceso: 16 Junio 2023].

- [31] K. Takemura, J. Batoh y S. e. a. Park, "Hechos, verdades y mitos sobre el camarón SPF en acuicultura," *AQUACULTURA*, pp. 20-38, 22 December 2022.
- [32] CNES / Airbus, "Map over Taura Shrimp pools.," Google Maps., 2023. [En línea]. Available: <https://www.google.com/maps/@-2.2926091,-79.7585681,684m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>. [Último acceso: 28 Junio 2023].
- [33] M. A. Varas-Chiquito, L. León-Bassantes, U. Villacis-Chancay y C. A. Alcívar-Aray, "Alimentación sistematizada vs Alimentación tradicional en la producción de camarón Vannamei," *Polo del Conocimiento*, vol. 2, nº 7, p. 18, 2017.
- [34] J. Valverde, "AGEARTH," 21 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.agearthecuador.org/wp2020/2021/02/10/manejo-de-la-calidad-del-agua-en-el-cultivo-de-camarones-analisis-de-un-caso/>. [Último acceso: 21 Julio 2023].
- [35] Pixhawk, "CubePilot Cube Orange Flight Controller," 8 Marzo 2023. [En línea]. Available: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/cubepilot_cube_orange.html. [Último acceso: 16 Agosto 2023].

Apéndices

A. Especificaciones técnicas de los componentes seleccionados

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de los motores seleccionados, este caso los T200 de la marca Blue Robotics.

Tabla A.1

Motor T200 de la marca Blue Robotics

Modelo	T200
Voltaje de alimentación [V]	10 – 20
Corriente de consumo [A]	10 – 24.2
Dimensiones [mm]	113 x 100Ø
Masa [g]	344

B. Programación para procesamiento de datos en Python

En esta sección se adjuntan las principales partes del código, en lenguaje Python, para el procesamiento y transmisión de la información recolectada a través de los sensores en el microcontrolador Raspberry pi.

-Módulo main:

```
if __name__ == "__main__":
    # Doesn't start until has been successfully connected to
    controller
    connection = None
    while connection is None:
        connection = utils.try_connect_autopilot()
    # Start comms via serial
    serial_comm = comms.main_communication("/tmp/COM10")
    ctrl = False
    while not ctrl:
        ctrl = serial_comm.try_connect()
    # Heartbeat comms
    beat = threading.Thread(
        target=utils.send_heartbeat, name="beat", args=[connection],
        daemon=True
    )
    beat.start()
    # Obtain Telemetry every 1 seconds
    status = threading.Thread(
        target=status.status_daemon,
        name="data",
        args=[connection, serial_comm, 5],
        daemon=True,
    )
    status.start()
    status.join()
    while True:
        # Try to establish a line of connection with the controller
        while connection is None:
            connection = utils.try_connect_autopilot()
```

-Módulo status:

```
def start_DO() -> spidev.SpiDev:
    # Start SPI connection
    DO_sensor = spidev.SpiDev() # Created an object
    DO_sensor.open(0, 0)
    GPIO.setmode(GPIO.BCM)
    return DO_sensor

def read_DO(DO_sensor, water_temp_c, channel: int = 0):
    # Read MCP3008 data
    DO_sensor.max_speed_hz = 1350000
    adc = DO_sensor.xfer2([1, (8 + channel) << 4, 0])
    raw_input = ((adc[1] & 3) << 8) + adc[2]

    # Calculate the DO value
```

```
v_measured = DO_values.v_ref * raw_input /
DO_values.ADC_RES
v_saturation = DO_values.low_v + (DO_values.high_v -
DO_values.low_v) * (
    water_temp_c - DO_values.low_t
) / (DO_values.high_t - DO_values.low_t)
DO_normalized = DO_values.DO_Table[int(water_temp_c)] *
(1 - water_temp_c % 1) + (
    water_temp_c % 1 *
DO_values.DO_Table[int(water_temp_c) + 1]
)
data = DO_normalized * v_measured / v_saturation
return data
```

```
def start_temp() -> str:
    # Start the thermometer sensor
    os.system("modprobe w1-gpio")
    os.system("modprobe w1-therm")

    # List the place where the sensor is writing
    base_dir = "/sys/bus/w1/devices/"
    device_folder = glob.glob(base_dir + "28*")[0]
    return device_folder + "/w1_slave"
```

```
def read_temp(file) -> float:
    with open(file, "r") as f:
        lines = f.readlines()

    while lines[0].strip()[-3:] != "YES":
        return None

    equals_pos = lines[1].find("=")
    if equals_pos == -1:
        return None
```

```
temp_string = lines[1][equals_pos + 2 :]
temp_c = int(temp_string) / 1000
return temp_c
```

```
def start_sonar() -> PingID:
    sonar = PingID()
    sonar.connect_serial("/dev/ttyUSB0", 115200)
    if sonar.initialize() is False:
        return None
    # set the speed of sound to use for distance calculations to
    1450000 mm/s (1450 m/s)
    sonar.set_speed_of_sound(1450000)
    return sonar
```

```
def read_sonar(sonar: PingID):
    if data := sonar.get_distance():
```

```

    return data["distance"] # , data["confidence"]
else:
    return 0

def status_daemon(
    connection: mavutil.mavfile,
    transmitter: comms.main_communication,
    interval: int = 0,
):
    sonar = None
    while sonar is None:
        sonar = start_sonar()

    DO_sensor = start_DO()
    temperature_filepath = start_temp()

    while True:
        try:
            status = {
                "lat": 0.0,
                "lon": 0.0,
                "hdg": 0.0,
                "vx": 0.0,
                "xy": 0.0,
                "rdist": 0.0,
                "temp": 0.0,
                "do": 0.0,
                "sonar": 0.0,
            }

            if msg := utils.try_get_message_data(connection,
"GLOBAL_POSITION_INT", 1):
                status["lat"] = msg.lat / 1e7 # deg
                status["lon"] = msg.lon / 1e7 # deg
                status["vx"] = msg.vx / 100 # m/s
                status["vy"] = msg.vy / 100 # m/s
                status["hdg"] = msg.hdg / 100 # deg

            if msg := utils.try_get_message_data(connection,
"DISTANCE_SENSOR", 1):
                status["rdist"] = msg.current_distance # cm

            status["sonar"] = read_sonar(sonar) * -1 # m
            water_temperature = read_temp(temperature_filepath) #
deg Celsius
            status["temp"] = round(water_temperature, 2)
            status["do"] = read_DO(DO_sensor, water_temperature) #
mg/L

            if status["vx"] > 0 or status["vy"] > 0:
                transmitter.send_json(status)
        except serial.SerialException:
            connection.close()
            connection = None

    if interval != 0:
        time.sleep(interval)

```

-Modulo collections:

```

class DO_values:
    v_ref = 5000 # mv
    ADC_RES = 1024 # ADC Resolution

    # Set up Pre-calibrated High temperature point
    high_v = 1600 # mv
    high_t = 25 # °C
    # Set up Pre-calibrated Low temperature point
    low_v = 1300 # mv

```

```

low_t = 15 # °C
# Set up DO Table provided by sensor
DO_Table = {
    0: 14.460,
    1: 14.220,
    2: 13.820,
    3: 13.440,
    4: 13.090,
    5: 12.740,
    6: 12.420,
    7: 12.110,
    8: 11.810,
    9: 11.530,
    10: 11.260,
    11: 11.010,
    12: 10.770,
    13: 10.530,
    14: 10.300,
    15: 10.080,
    16: 9.860,
    17: 9.660,
    18: 9.460,
    19: 9.270,
    20: 9.080,
    21: 8.900,
    22: 8.730,
    23: 8.570,
    24: 8.410,
    25: 8.250,
    26: 8.110,
    27: 7.960,
    28: 7.820,
    29: 7.690,
    30: 7.560,
    31: 7.430,
    32: 7.300,
    33: 7.180,
    34: 7.070,
    35: 6.950,
    36: 6.840,
    37: 6.730,
    38: 6.630,
    39: 6.530,
    40: 6.410,
}

```

-Módulo comms:

```

class main_communication:
    def __init__(
        self, port_name: str, baudrate: int = 115200, timeout: int = 1
    ) -> None:
        self.ser = serial.Serial()
        self.ser.port = port_name
        self.ser.baudrate = baudrate
        self.ser.timeout = timeout

```

```

def accept_message(self, keyword: str) -> bool:
    buffer_serial = self.ser.in_waiting
    if buffer_serial > 0:
        message = self.ser.read(buffer_serial).decode().strip()
        if message == keyword:
            self.ser.reset_output_buffer()
            return True
    return False

```

```

def listen_message(self) -> bool:
    msg = None

```

```

while self.ser.in_waiting > 0:
    msg = self.ser.readline().decode().rstrip()
    self.ser.reset_output_buffer()
return msg

def send_json(self, data: dict):
    json_msg = json.dumps(data).encode()
    try:
        self.ser.reset_input_buffer()
        self.ser.write(json_msg)
    except serial.SerialTimeoutException as e:
        print(f"An error happened: {e}")
    except serial.SerialException as e:
        self.ser.close()
        raise RuntimeError(
            "Could not complete the data send request. Please try to
connect first."
        ) from e

def send_message(self, data: any):
    try:
        self.ser.reset_input_buffer()
        self.ser.write(f"{data}\n".encode())
    except serial.SerialTimeoutException as e:
        print(f"An error happened: {e}")
    except serial.SerialException as e:
        self.ser.close()
        raise RuntimeError(
            "Could not complete the data send request. Please try to
connect first."
        ) from e

```

-Módulo utils:

```

def try_connect_autopilot():
    try:
        # Create the connection
        listPort = serial.tools.list_ports.comports()
        listPort = listPort[:-1]
        for puerto in listPort:
            if "Cube" in puerto.description:
                connection: mavutil.mavfile =
mavutil.mavlink_connection(puerto.device)

```

```

# Wait a heartbeat before sending commands
while connection.target_system == 0:
    connection.wait_heartbeat()
return connection

except serial.SerialException as e:
    return None
except Exception as e:
    connection.close()
    print(f"An error happened: {e}")
    return None
return None

def get_ack(connection: mavutil.mavfile):
    # Wait for ACK command
    ack_msg = connection.recv_match(type="COMMAND_ACK",
blocking=True)
    if not ack_msg or ack_msg and ack_msg.get_type() ==
"BAD_DATA":
        return None
    # Obtain the ACK result
    ack_msg = ack_msg.to_dict()
    return
mavutil.mavlink.enums["MAV_RESULT"][ack_msg["result"]].des
cription

def send_heartbeat(connection: mavutil.mavfile):
    while True:
        try:
            connection.mav.heartbeat_send(

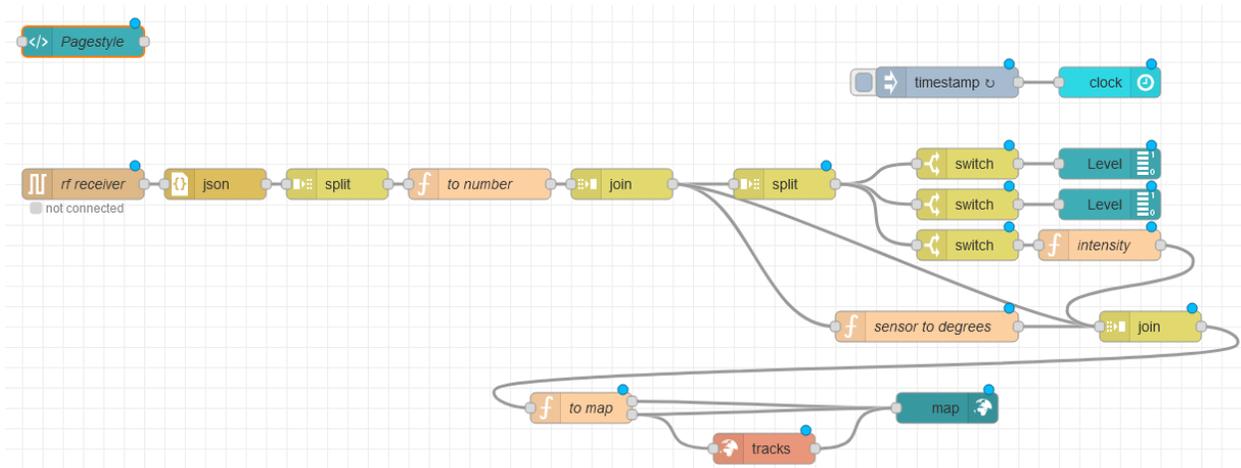
mavutil.mavlink.MAV_TYPE_ONBOARD_CONTROLLER,
            mavutil.mavlink.MAV_AUTOPILOT_INVALID,
            0,
            0,
            0,
        )
        time.sleep(5e-1) # 1 Hz recomendable, manejado a 5 Hz
    except serial.SerialException:
        connection.close()
        connection = None

```

C. Código de visualización de datos de mapeado y monitoreo vía NodeRed

Figura C.1

Bloques de nodos que representan la visualización de los datos en la página del servidor local.



Código de sensor a grados:

```
function radians(degrees) {
    return degrees * (Math.PI / 180);
}
```

```
function degrees(radians) {
    return radians * (180 / Math.PI);
}
```

```
//Radio ecuatorial de la Tierra en metros
```

```
const R = 6378137
```

```
const rlat =
```

```
radians(msg.payload.lat);
```

```
const rlon =
```

```
radians(msg.payload.lon);
```

```
const abrg =
```

```
radians(msg.payload.hdg);
```

```
const d = msg.payload.rdist / 100;
```

```
//cm a metros
```

```
let dlat = Math.asin(Math.sin(rlat) *
Math.cos(d / R) + Math.cos(rlat) *
Math.sin(d / R) * Math.cos(abrg))
let dlon = rlon + Math.atan2(
    Math.sin(abrg) * Math.sin(d / R)
    * Math.cos(rlat),
    Math.cos(d / R) - Math.sin(rlat)
    * Math.sin(dlat)
)
msg.payload = {
    olat: degrees(dlat),
    olon: degrees(dlon)
};
return msg;
```

Código de intensidad:

```
let val = -1 * (-1 * msg.payload) /
25;
if (msg.payload > 5) {
    val = 1;
}
```

```
msg.payload = {'intensity': 1 - val};  
return msg;
```

Código de trasladar al mapa:

```
let object= {  
  layer: "Objects",  
  lat: msg.payload.olat,  
  lon: msg.payload.olon,  
  name: Date.now(),  
  icon: "hostile",  
  color: "#000000",  
};  
let track = {  
  layer: "Track",  
  lat: msg.payload.lat,  
  lon: msg.payload.lon,  
  bearing: msg.payload.hdg,  
  speed:  
Math.sqrt(Math.pow(msg.payload.vx,2)  
+ Math.pow(msg.payload.vy,2)),  
  name: "🚢",  
  icon: "ship",  
  color: "#1fc8f2",  
  intensity: msg.payload.intensity,  
};  
let msg1 = {  
  payload: object,  
  topic: "Objeto"  
};  
let msg2 = {  
  payload: track,  
  topic: "Ruta"  
};  
return [msg1, msg2];
```

D. Análisis de velocidad máxima de la embarcación

Figura D.1

Simulación CFD a 0.5 m/s

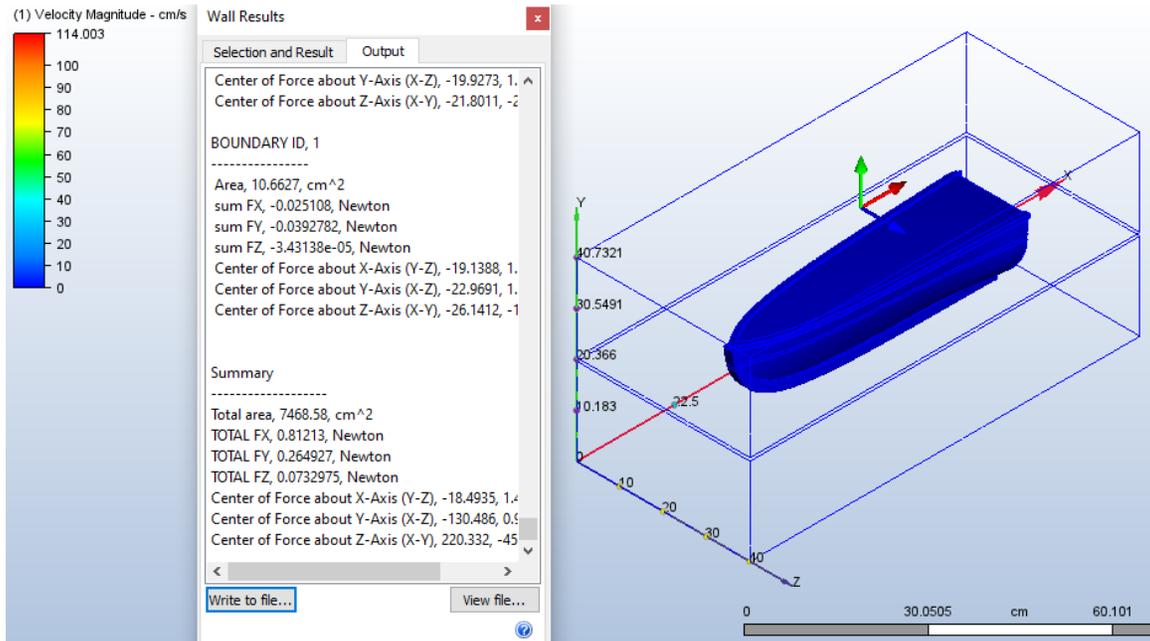


Figura D.2

Simulación CFD a 1 m/s

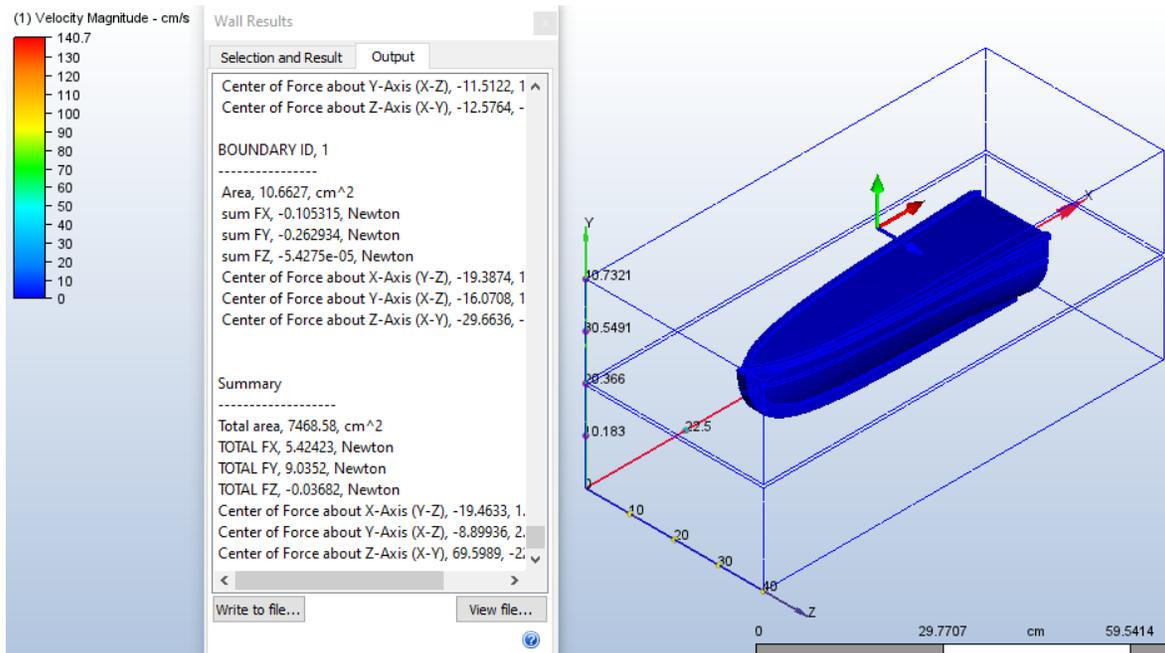


Figura D.3

Simulación CFD a 1.5 m/s

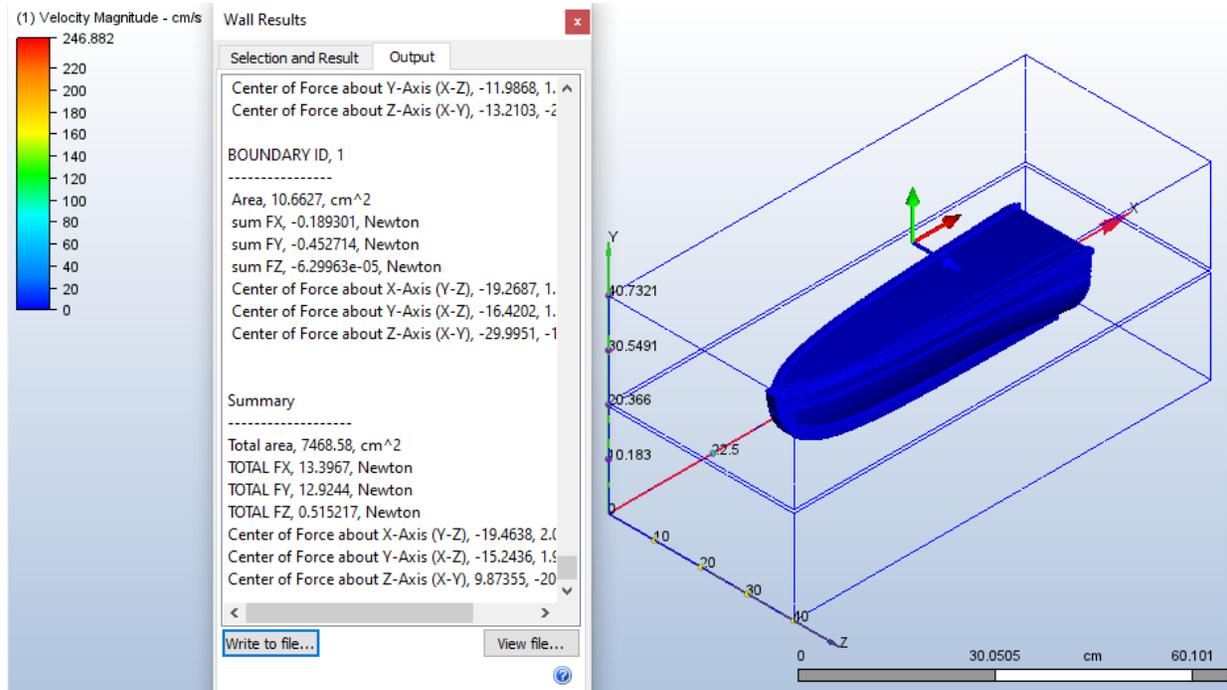


Figura D.4

Simulación CFD a 2 m/s

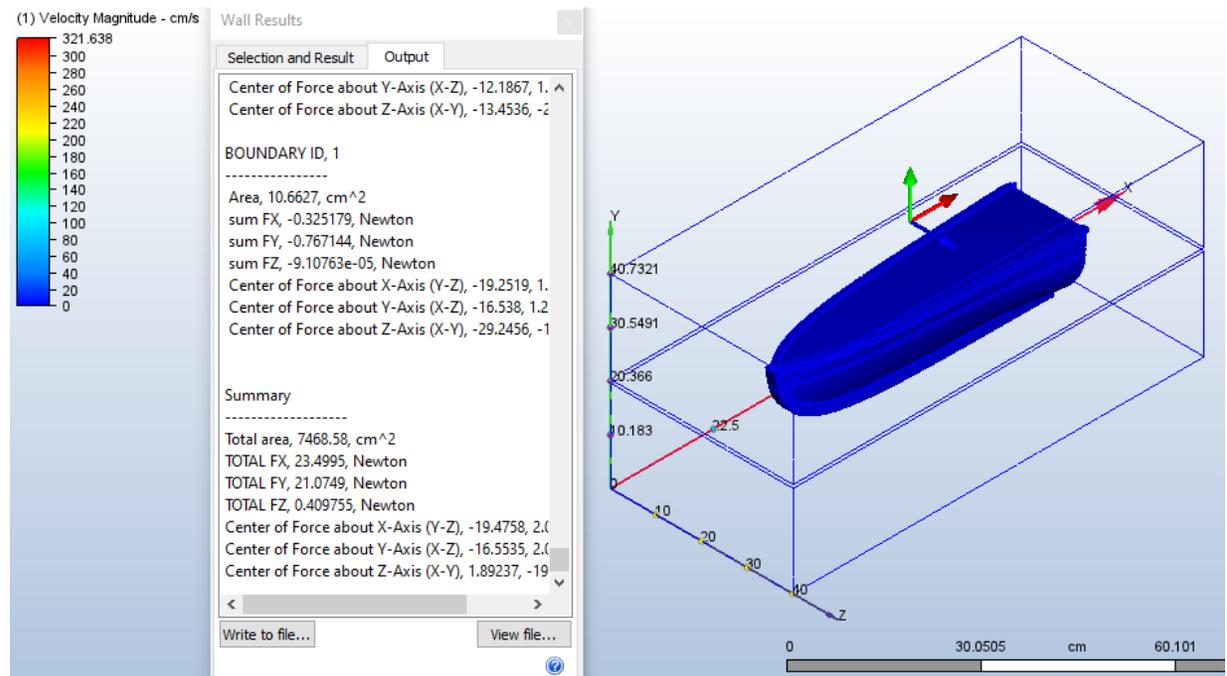


Figura D.5

Empuje vs señal PWM según el fabricante [28]

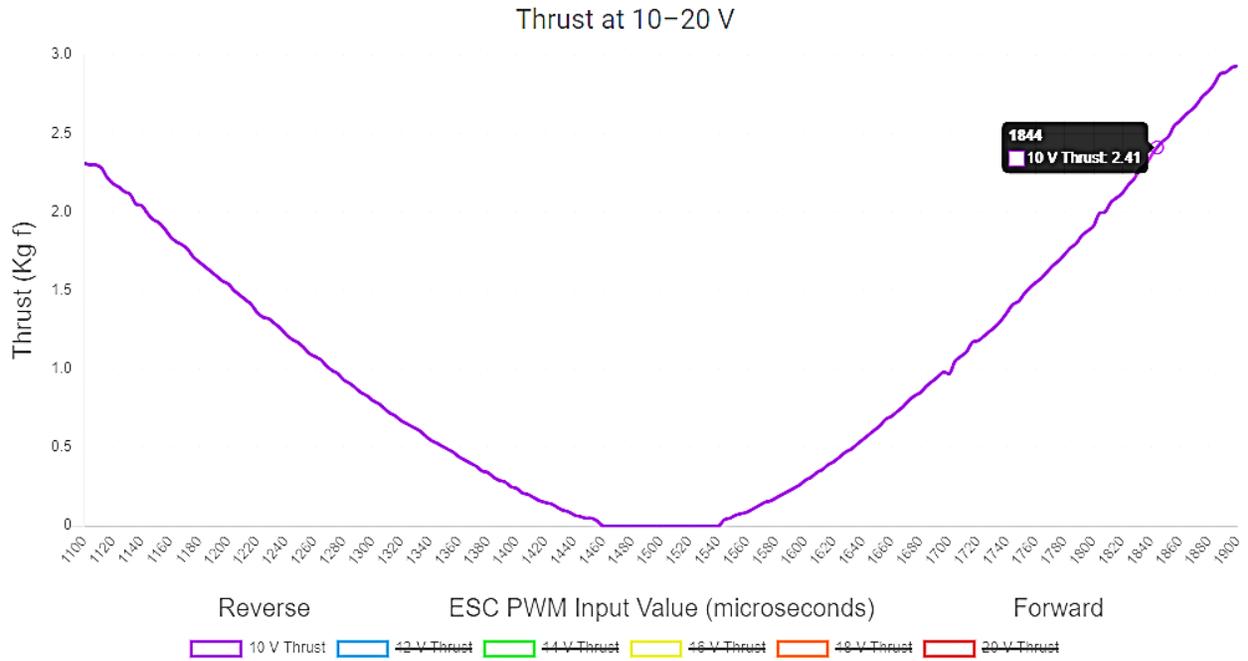
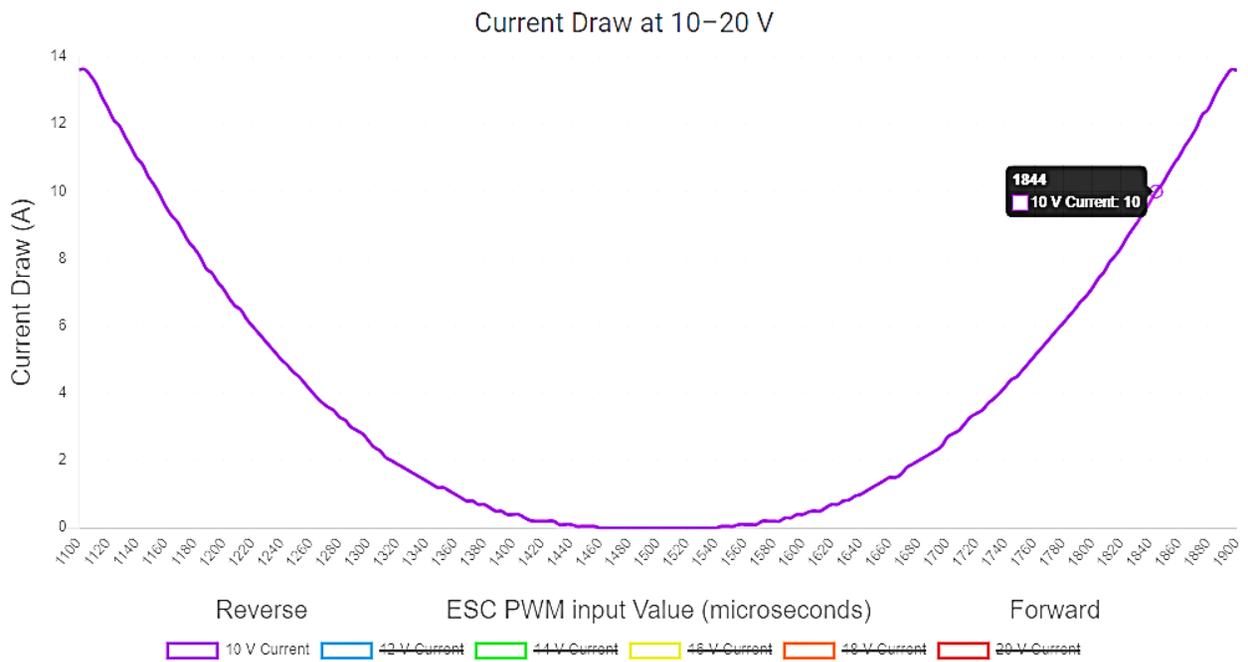


Figura D.6

Corriente vs señal PWM según el fabricante [28]



Las simulaciones CFD son útiles para estimar la interacción de modelos computacionales, de por ejemplo vehículos, con fluidos. Esto las vuelve una gran herramienta para predecir el comportamiento de un diseño en ambientes a los que deberían enfrentarse en su implementación, lo que puede ayudar a corregir errores en la etapa de diseño. Sin embargo, estas simulaciones no dejan de tener un alto costo computacional, por lo que será necesario optimizar el uso de los recursos.

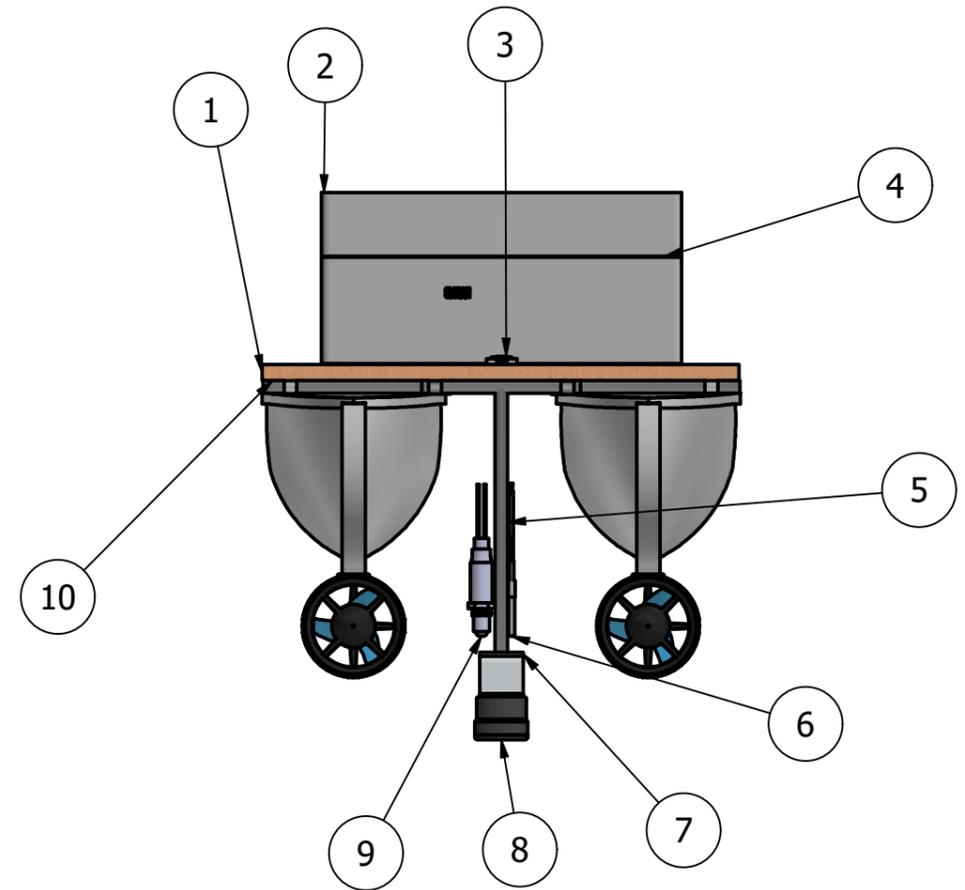
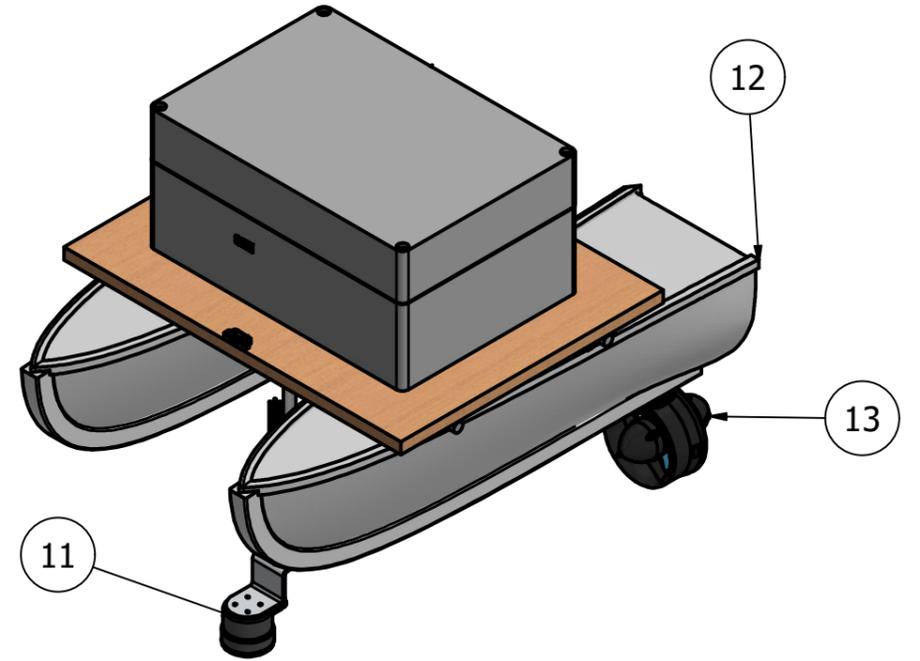
En este caso, ya que se trata de una embarcación acuática, y queriendo conocer la fuerza de oposición al avance, se sabe que esta se centra particularmente en la interacción con el agua debido a su alta densidad en comparación al aire. Es por esto que la simulación CFD se realizará únicamente con el casco del modelo, pero tendrá una compensación. Dado que el área transversal del resto de la embarcación es aproximadamente el doble, pero se enfrenta a un fluido casi ochocientas veces menos denso, se considera apropiado un factor de 1.5.

Previamente se han definido los parámetros de funcionamiento de los motores con un voltaje de 10 V y una corriente de 10 A, según el fabricante en la Figura D.6 esto emite una señal PWM de 1844 microsegundos. A partir de la señal PWM en la Figura D.5 el fabricante indica que el motor genera 2.41 kg de empuje, lo que equivale a 23.64 N. Con el uso de la ecuación 4.1 se observa que los 2 m/s sobrepasan las capacidades del motor, pues la fuerza F_x de la Figura D.4 equivaldría a unos 35.25 N, pero en la Figura D.3 se observa que la fuerza F_x equivaldría a 20.1 N. Es así como se considera apropiado definir como velocidad máxima de la embarcación los 1.5 m/s.

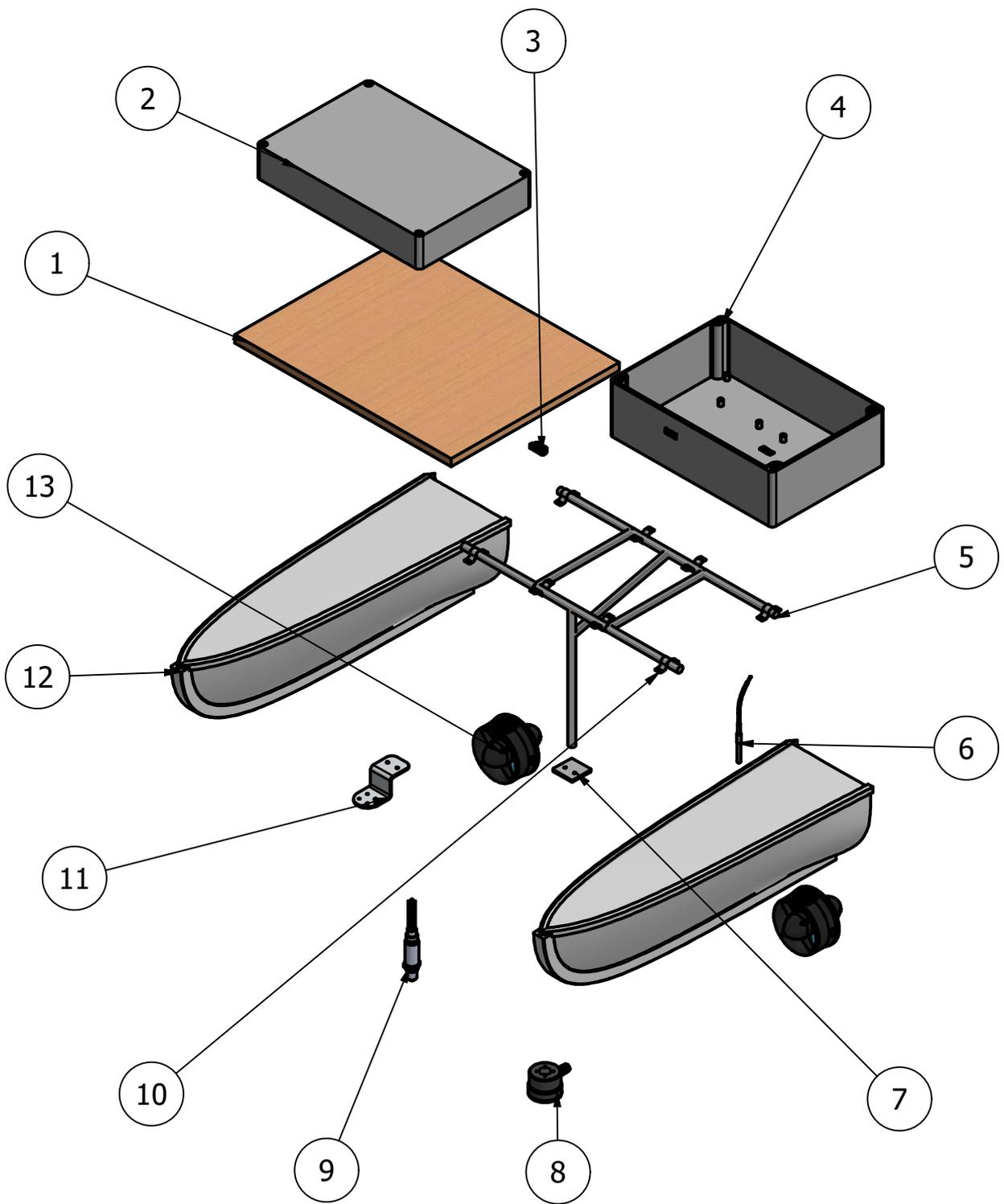
E. Dimensiones y planos de la embarcación

En esta sección se presentan distintas perspectivas de la embarcación para una mejor comprensión del sistema desarrollado en el presente proyecto. Además, se incluyen planos dimensionados en milímetros para muestra de las piezas diseñadas.

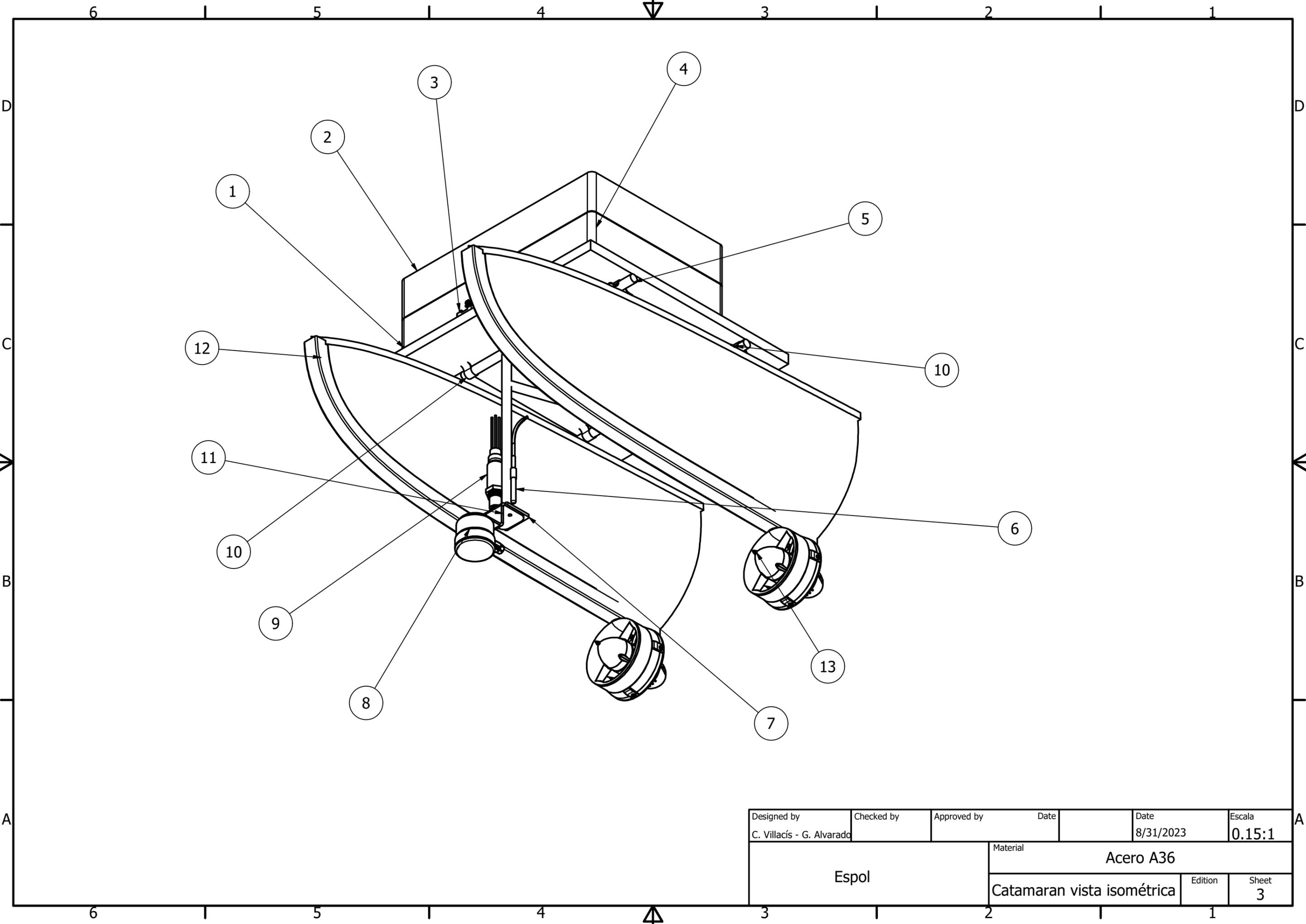
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Plataforma	Balsa 350 x 450 x 15 mm
2	1	Cajetin eléctrico	Plástico 250 x 350 x 150 mm
3	1	Lidar	Lidar ST VL53L1X
4	1	Tapa de cajetín	Plástico 250 x 350 x 20 mm
5	1	Armadura	Acero 12 mm con pintura protectora
6	1	Sensor de temperatura	DS18B20-Temp-Sensor
7	1	Placa sonar	
8	1	Sonar	Ping2 Sonar
9	1	Sensor de oxígeno disuelto	O2 SENSOR-01
10	8	Agarradera armadura	
11	1	Base sonar	
12	2	Casco	Recubierto de fibra de vidrio
13	2	Motor	T200-THRUSTER-R1



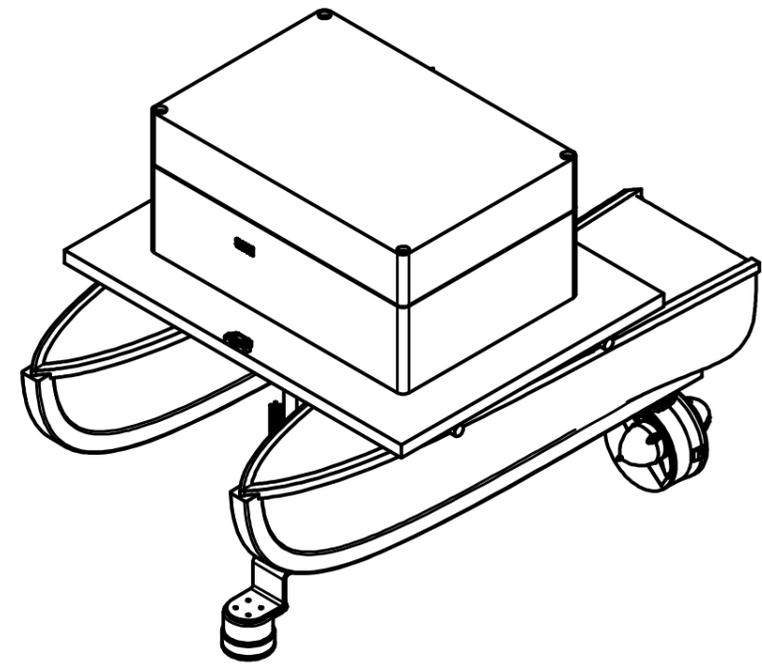
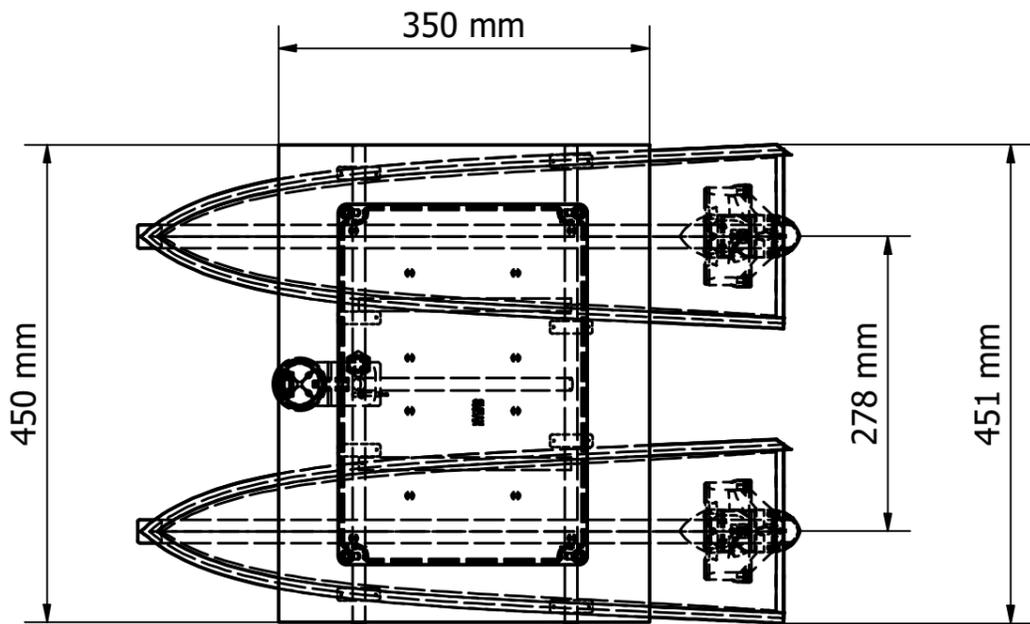
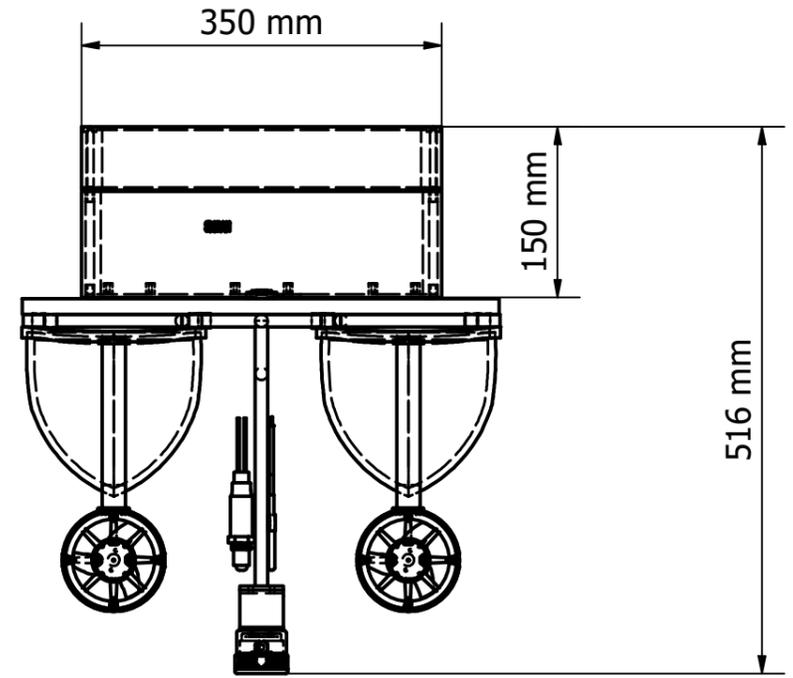
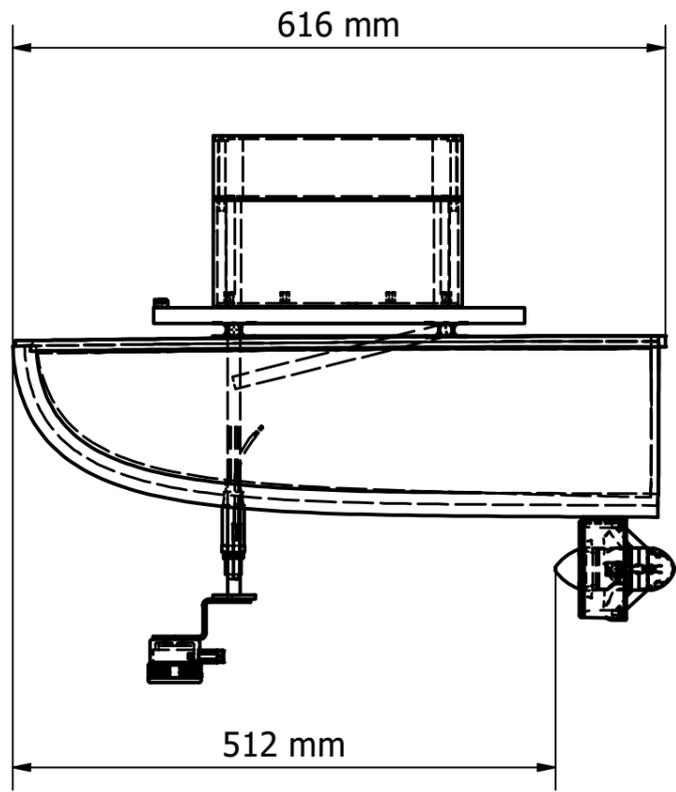
Designed by C. Villacís - G. Alvarado	Checked by	Approved by	Date	Date 8/31/2023
Espol			Componentes catamaran	Edition
			Sheet 1	



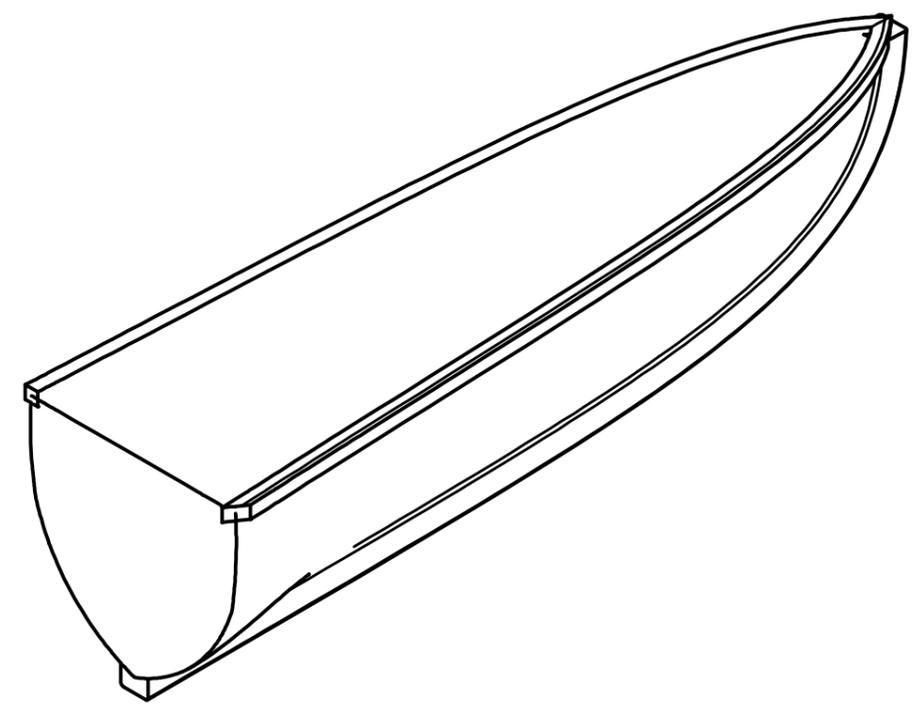
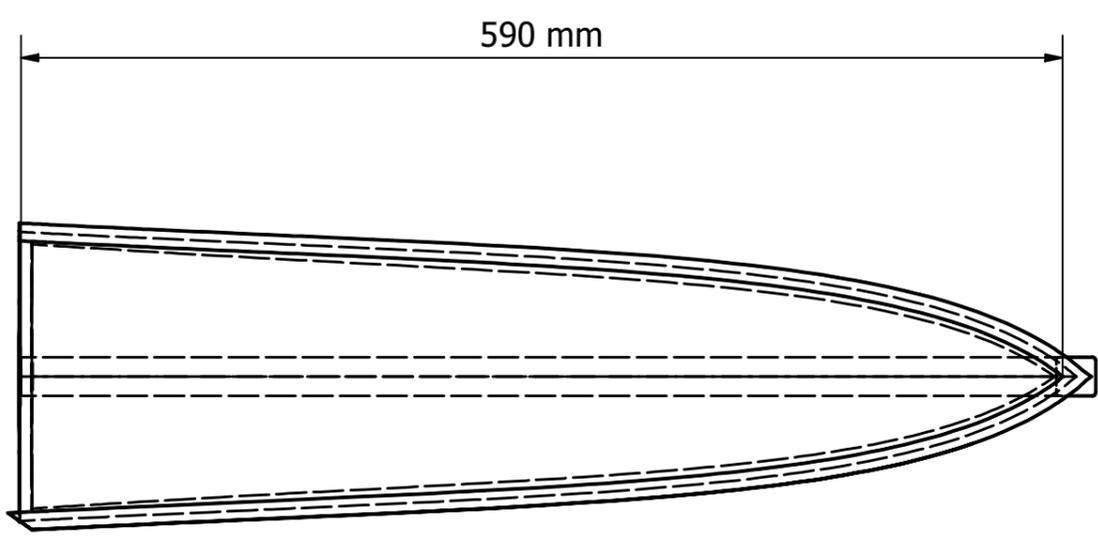
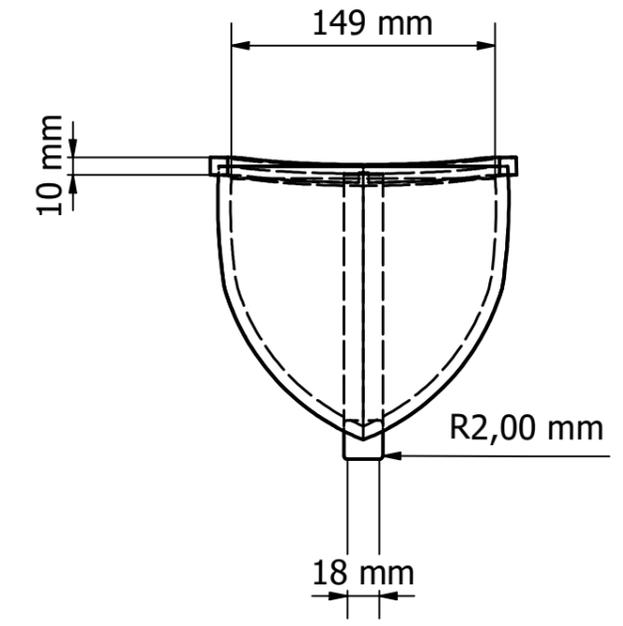
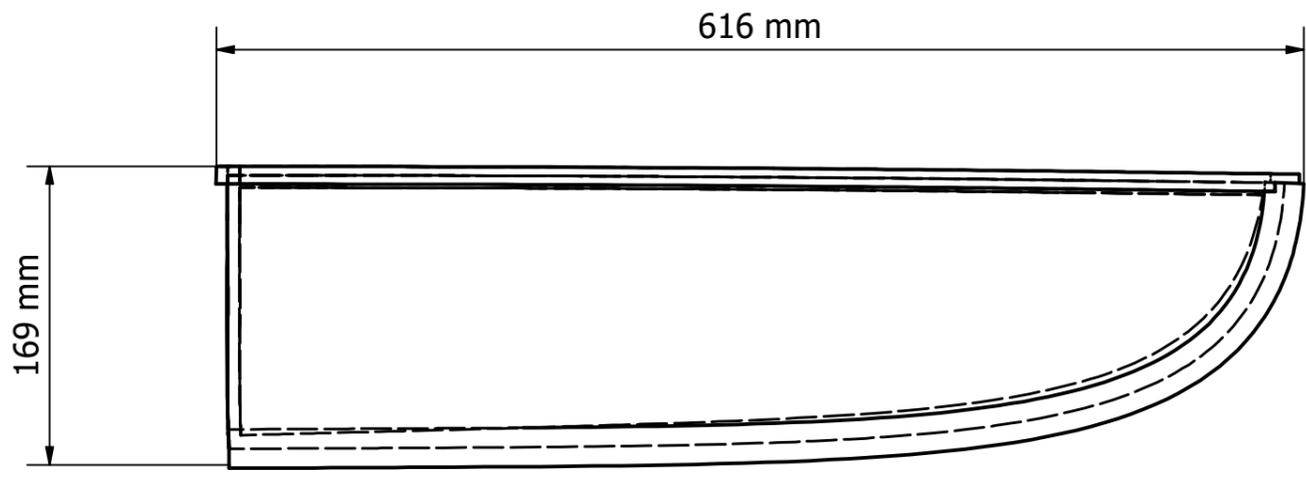
DESIGNED BY C. Villacís - G. Alvarado	CHECKED BY	APPROVED BY	DATE	DATE 9/20/2023	Escala 1:9
Espol			Vista explosionada		ISSUE
					SHEET 2



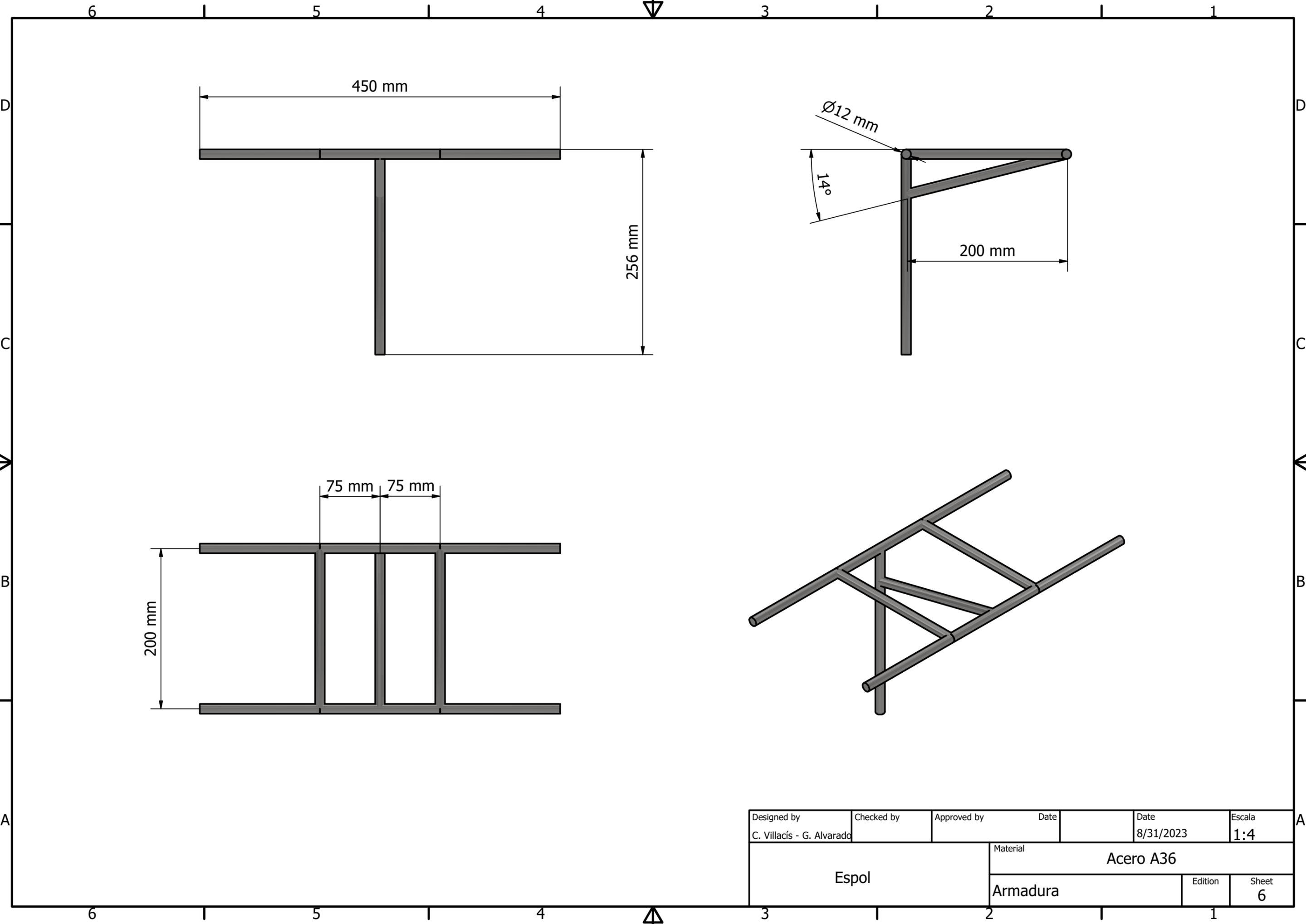
Designed by C. Villacís - G. Alvarado	Checked by	Approved by	Date	Date 8/31/2023	Escala 0.15:1
Espol			Material Acero A36		
Catamaran vista isométrica				Edition	Sheet 3



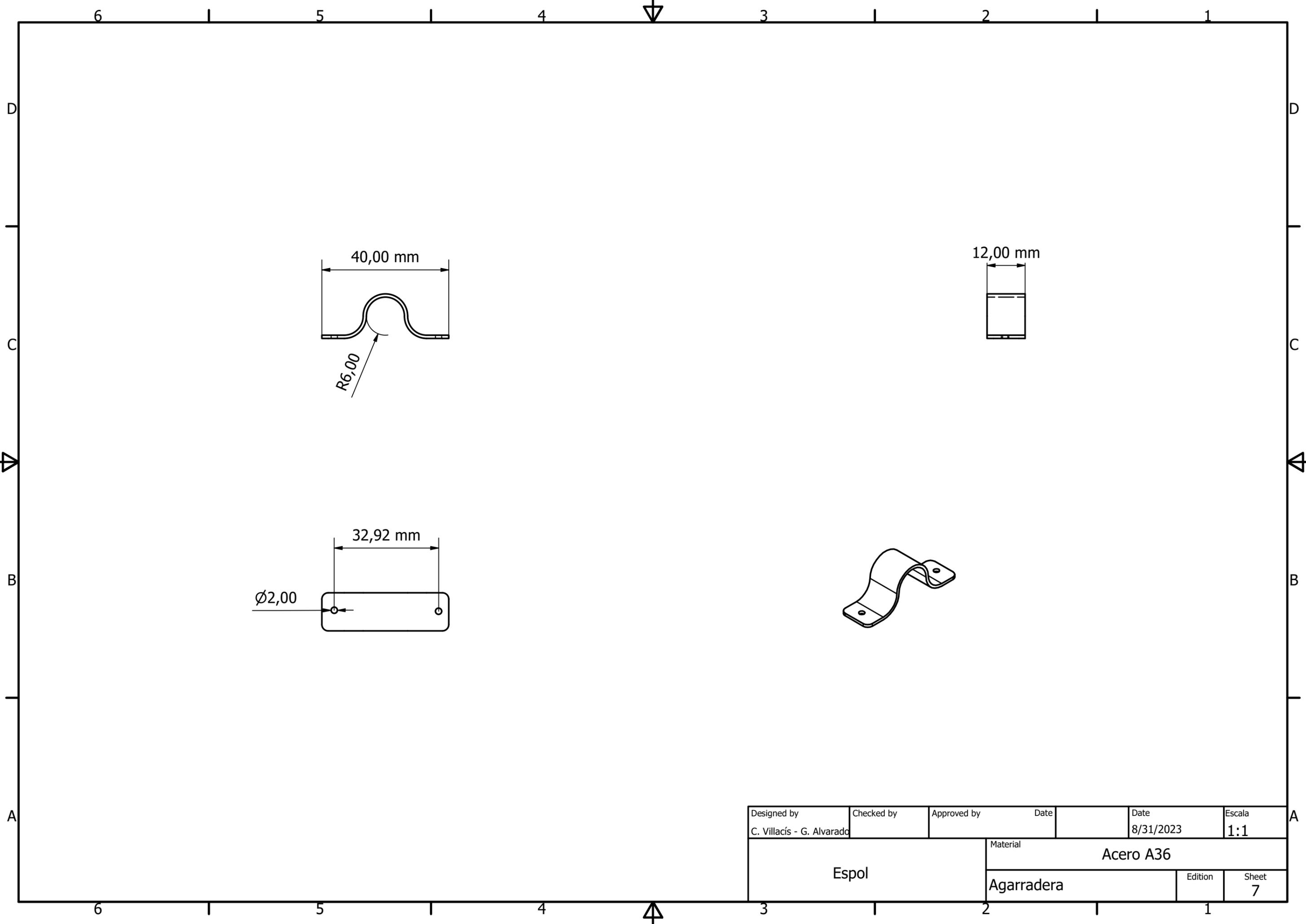
Designed by C. Villacís - G. Alvarado	Checked by	Approved by	Date	Date 8/31/2023	Escala 0.15:1
Espol		Material Acero A36			
		Catamaran dibujo		Edition	Sheet 4



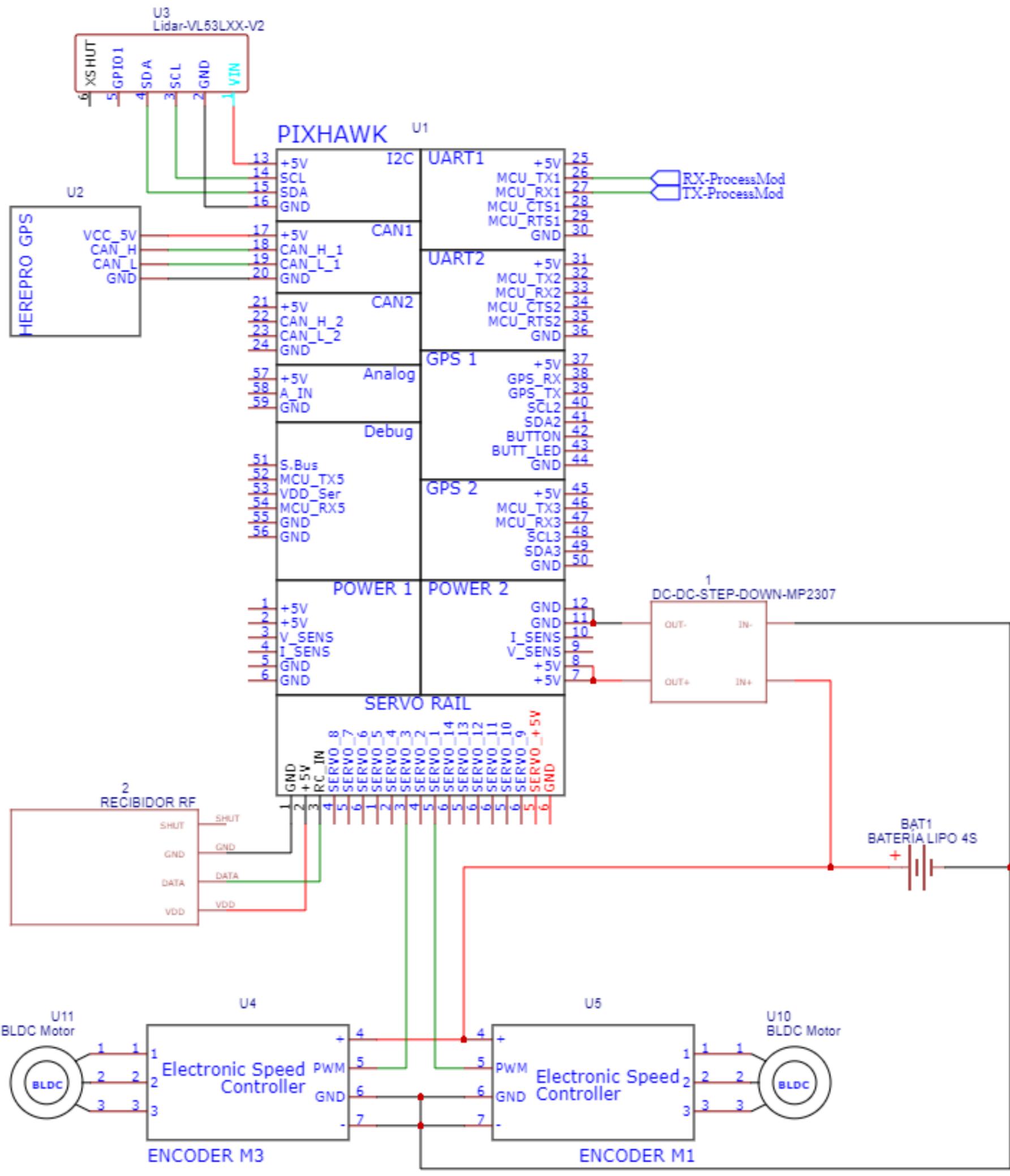
Designed by C. Villacís - G. Alvarado	Checked by	Approved by	Date	Date 8/31/2023	Escala 1:4
Espol			Material Polietireno expandido y fibra de vidrio		
Casco				Edition	Sheet 5

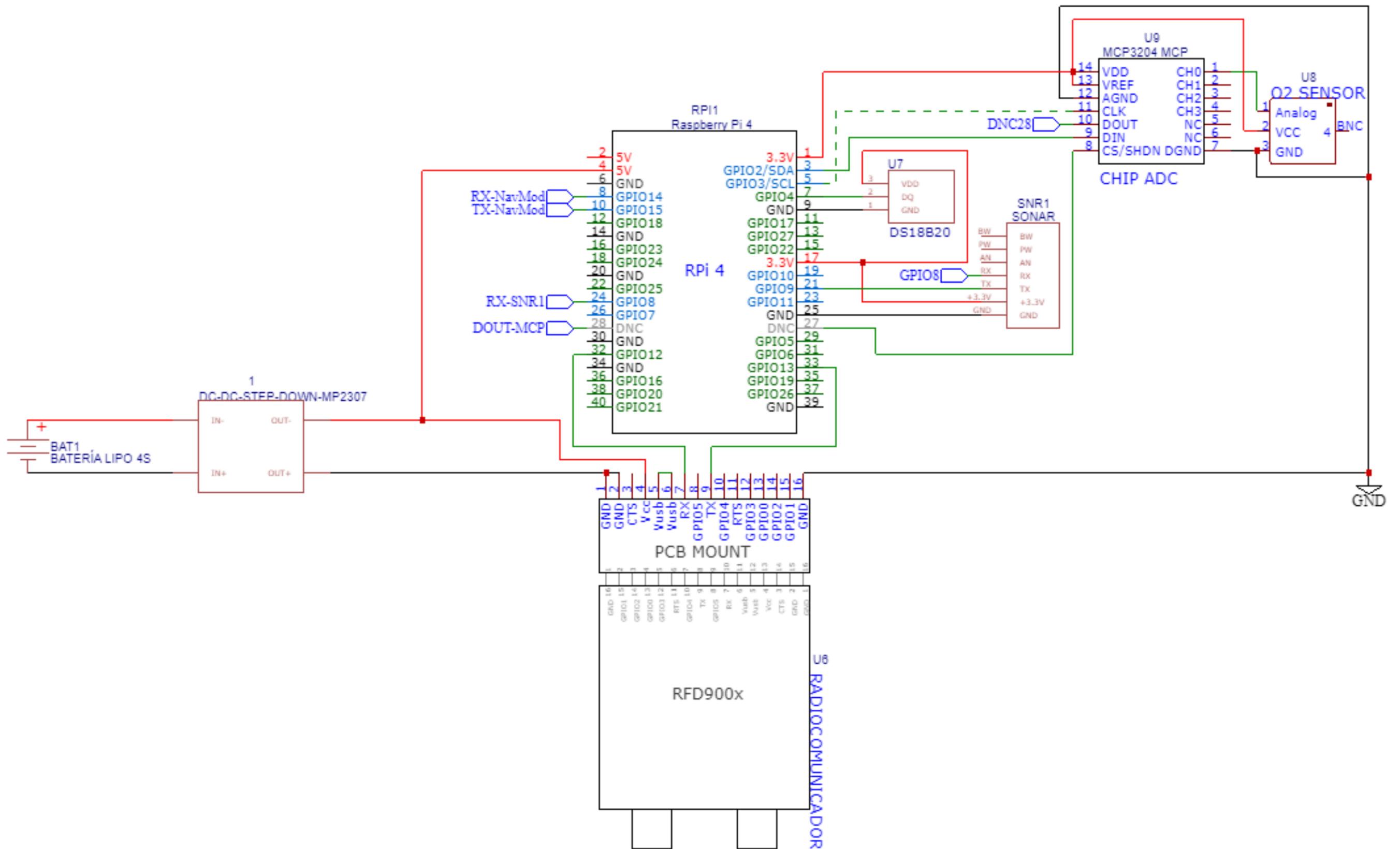


Designed by C. Villacís - G. Alvarado	Checked by	Approved by	Date	Date 8/31/2023	Escala 1:4
Espol			Material Acero A36		
			Armadura	Edition	Sheet 6



Designed by C. Villacís - G. Alvarado	Checked by	Approved by	Date	Date 8/31/2023	Escala 1:1
Espol			Material Acero A36		
			Agarradera		Edition 7





TITLE:		REV: 1.1
PLANO 9 - Diagrama electrónico del módulo de procesamiento		Sheet: 9
	Company: ESPOL	Date: 2023-08-23
	Drawn By: Alvarado, G.; Villacís	