



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Diseño de un vehículo de superficie no tripulado tipo trimarán para monitoreo de cuerpos de agua lénticos de la región hidrográfica del Amazonas en el Perú

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR(ES)

Farfan Olivares, Kenny Einstein	0009-0009-2923-6846
Ordoñez Yapuchura, Alvaro Adriano	0009-0006-9863-8708

ASESOR(ES)

Becerra Felipe, Jose Luis	0000-0001-5098-611X
---------------------------	---------------------

Lima, 30 de noviembre de 2025

DEDICATORIA

“A mis padres José Antonio y Lidia, y a mis hermanas Bélgica y Brenda, por sus palabras de aliento y su continua preocupación. A mi profesor Leonardo V., por ser guía fundamental en el desarrollo de esta investigación. A Omar R., por brindarme su confianza e impulso al inicio de mi trayectoria laboral. Y a mis amigos: Georgina W., José R., Lia C., Diana G., Ariana P., Ítalo D. C., Alessandro S. y Robert V., por su apoyo y compañía en los momentos difíciles.”

Alvaro Ordoñez

“Este trabajo se lo dedico a mi hija, Eimy, y a mi compañera de vida, Ana, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome su amor, apoyo y motivación. A mis padres, Hilario y Marlene, por su apoyo incondicional y por confiar siempre en mí. A mis hermanas, Luz, Ofelia y Lady, por su constante preocupación, sus palabras de aliento y su comprensión. Sin ellos, este logro no habría sido posible.

A mi abuela Victoria, quien siempre confió en mí y jamás dudó de mis capacidades. Finalmente, a mi profesor Leonardo V., por su confianza y apoyo en el desarrollo de esta investigación.”

Kenny Farfan

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que han sido fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo.

En primer lugar, deseamos agradecer a nuestro asesor, Ing. José Becerra, por su compromiso, dedicación y guía constante, que han sido esenciales para estructurar y concluir esta investigación.

Asimismo, agradecemos al Ing. Leonardo Vínces por su apoyo y asesoría durante el desarrollo del proyecto.

Extendemos también nuestro agradecimiento a la empresa TECNOCONTROL S.A.C., por brindarnos el acceso a recursos, equipos e instalaciones que hicieron posible la ejecución de este trabajo.

Finalmente, queremos expresar nuestra profunda gratitud a nuestras familias, seres queridos, amigos, profesionales y personas cercanas que nos brindaron su apoyo, ánimo y comprensión a lo largo de nuestra formación académica.

Gracias.

RESUMEN

En el Perú, el monitoreo de la calidad del agua en lagos y lagunas sigue siendo limitado por el difícil acceso y la dependencia de embarcaciones tripuladas, lo que reduce la frecuencia de muestreo y expone a riesgos al personal. Este trabajo presenta el diseño de un vehículo de superficie no tripulado (USV) tipo trimarán destinado al monitoreo de cuerpos lénticos de la región hidrográfica del Amazonas. El diseño se desarrolló siguiendo normas para embarcaciones pequeñas (ISO 8666, ISO 12215, ISO 12216 e ISO 12217-3) e integra criterios hidrostáticos, hidrodinámicos, estructurales y eléctricos. Se modelaron los cascos en Maxsurf y se evaluaron mediante simulaciones CFD en ANSYS, obteniéndose un desplazamiento total aproximado de 41,76 kg con francobordo adecuado y altura metacéntrica positiva para la categoría D. Se dimensionó una estructura tipo sándwich de fibra de vidrio y madera balsa, y se implementó un sistema de muestreo con dos botellas Van Dorn de 2,0 L accionadas por servomotor, además de soportes para una sonda multiparamétrica, un módulo GPS con IMU y la electrónica embarcada. El sistema de propulsión emplea propulsores eléctricos gobernados por radiocontrol y alimentados por un banco de baterías de ion-litio 3S, que proporciona una autonomía estimada de 120 minutos. El diseño propuesto constituye una plataforma segura y portable para ampliar la cobertura espacial y temporal del monitoreo de calidad de agua en lagos y lagunas peruanos.

Palabras clave: vehículo de superficie no tripulado; monitoreo de calidad de agua; cuerpos lénticos; trimarán; botellas Van Dorn; región hidrográfica del Amazonas

Design of an unmanned surface trimaran-type vehicle for monitoring lentic water bodies in the Amazon hydrographic region of Peru

ABSTRACT

Peru's monitoring of lake and lagoon water quality is still limited by difficult access and the reliance on manned boats, which constrains sampling frequency and exposes field staff to operational risks. This work presents the design of a trimaran-type Unmanned Surface Vehicle (USV) for monitoring lentic water bodies in the Amazon hydrographic region of Peru. The design follows small-craft standards (ISO 8666, ISO 12215, ISO 12216 and ISO 12217-3) and combines hydrostatic, hydrodynamic, structural and electrical criteria. The hulls were modelled in Maxsurf and evaluated through CFD simulations in ANSYS. Results indicate a total displacement of about 41.76 kg, with adequate freeboard and positive metacentric height for design category D. A sandwich structure made of fiberglass and balsa wood was sized, and a water-sampling system based on two 2.0 L Van Dorn bottles driven by a waterproof servo was integrated into the main hull together with a multiparameter probe support, GPS with IMU and onboard electronics. The propulsion system uses DC thrusters controlled by a radio transmitter-receiver pair and powered by a custom 3S lithium-ion battery pack, providing an estimated autonomy of 120 minutes. The proposed USV offers a safe and portable platform to expand the spatial and temporal coverage of water-quality monitoring in Peruvian lakes and lagoons.

Keywords: unmanned surface vehicle; water quality monitoring; trimaran; lentic water bodies; Amazon hydrographic region; Van Dorn bottles

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorioacademico.upc.edu.pe

Fuente de Internet

2%

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

3

Submitted to Universidad Privada del Norte

Trabajo del estudiante

1%

4

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

5

repositorio.uan.edu.co

Fuente de Internet

<1%

6

www1.ing.unlp.edu.ar

Fuente de Internet

<1%

7

wwz.ifremer.fr

Fuente de Internet

<1%

8

Submitted to Universidad Politécnica de Madrid

Trabajo del estudiante

<1%

9

repositorio.comillas.edu

Fuente de Internet

<1%

10

issuu.com

Fuente de Internet

<1%

11

Submitted to Universidad Europea de Madrid

Trabajo del estudiante

<1%

12	www.underwaterthruster.com Fuente de Internet	<1 %
13	tienda.aenor.com Fuente de Internet	<1 %
14	"V Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2011 May 16-21, 2011, Habana, Cuba", Springer Science and Business Media LLC, 2013 Publicación	<1 %
15	prezi.com Fuente de Internet	<1 %
16	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Organismo de Evaluación y Fiscalización Trabajo del estudiante	<1 %
19	www.elperulegal.com Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.upsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
21	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to University of Queensland Trabajo del estudiante	<1 %
23	Submitted to Universidad Tecnológica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
24	Submitted to unapiquitos Trabajo del estudiante	<1 %

<1%

25 futur.upc.edu
Fuente de Internet

<1%

26 www.en-standard.eu
Fuente de Internet

<1%

Excluir citas	Apagado	Exclude assignment template	Activo
Excluir bibliografía	Activo	Excluir coincidencias	< 20 words

TABLA DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO	12
1.1	ANTECEDENTES	12
1.2	DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN	17
1.3	ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	18
1.4	OBJETIVOS.....	19
1.4.1	General.....	19
1.4.2	Específicos.....	19
1.5	PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	19
2	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	20
2.1	MARCO CONCEPTUAL.....	20
2.1.1	Vocabulario	20
2.1.2	Dinámica de fluidos computacional	23
2.1.3	Método de volúmenes finitos	23
2.1.4	Prueba de asimetría (skewness).....	24
2.1.5	Altura metacéntrica transversal	25
2.1.6	Coeficientes de formas de embarcaciones.....	25
2.1.6.1	Coeficiente de bloque	25
2.1.6.2	Coeficiente prismático.....	26
2.2	ESTÁNDARES, FRAMEWORKS Y BUENAS PRÁCTICAS	27
2.2.1	Estándar ISO 8666:2020. Embarcaciones pequeñas — Datos principales ...	27
2.2.2	Estándar ISO 12215-5:2019. Embarcaciones pequeñas – Construcción de casco y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño para monocascos, tensiones de diseño, determinación de escantillones	27
2.2.3	Estándar ISO 12216:2020. Embarcaciones pequeñas – Ventanas, portillos, escotillas, tragaluces y puertas – Requisitos de resistencia y estanqueidad.	28
2.2.4	Estándar ISO 12217-3:2022. Embarcaciones pequeñas — Evaluación y categorización de la estabilidad y flotabilidad. Parte 3: Embarcaciones con eslora inferior a 6 m	29
2.2.5	Estándar IEC 62133-2:2017. Pilas y baterías secundarias que contienen electrolitos alcalinos u otros electrolitos no ácidos – Requisitos de seguridad para	

	pilas secundarias selladas portátiles y para baterías fabricadas con ellas, para uso en aplicaciones portátiles – Parte 2: Sistemas de litio.....	30
2.3	BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO	30
2.3.1	Resolución Ministerial N.º 237-2023-MINAM.....	30
2.3.2	Decreto Supremo N.º 023-2021-MINAM	30
2.3.3	Resolución Ministerial N.º 121-2022-MINAM.....	31
2.3.4	Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA	31
2.3.5	Decreto Supremo N.º 020-2007-MTC.....	31
2.3.6	Resolución Ministerial N.º 0597-2023-MTC/01.03	31
3	CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO	31
3.1	DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....	33
3.1.1	Diseño mecánico.....	33
3.1.1.1	Requisitos y condiciones operativas.....	33
3.1.1.2	Definición de dimensiones principales.....	35
3.1.1.3	Modelado del casco en Maxsurf.....	36
3.1.1.4	Simulación CFD	40
3.1.1.5	Diseño mecánico-estructural de los cascos	49
3.1.2	Diseño del sistema de muestreo	54
3.1.3	Diseño de estructuras de soporte de equipos electrónicos.....	57
3.1.3.1	Soporte de sensor multiparamétrico	57
3.1.3.2	Soporte para GPS y módulo de comunicación	61
3.1.4	Ensamblaje del USV y evaluación de estabilidad transversal.....	62
3.1.5	Diseño eléctrico	65
3.1.5.1	Definición de requerimientos	65
3.1.5.2	Selección de sonda multiparamétrica	65
3.1.5.3	Selección de GPS con IMU	67
3.1.5.4	Selección de propulsores	67
3.1.5.5	Selección de actuador lineal eléctrico	68
3.1.5.6	Selección de servomotor.....	69

3.1.5.7	Unidad de Procesamiento y Adquisición	69
3.1.5.8	Módulo de comunicación para transferencia de datos.....	70
3.1.5.9	Selección de sensor de voltaje	71
3.1.5.10	Selección de sensor de corriente.....	71
3.1.5.11	Cálculo de consumo energético.....	72
3.1.5.12	Selección de radiocontrol	78
3.1.5.13	Funcionamiento del sistema de propulsión	79
3.2	RESULTADOS ESPERADOS.....	82
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
4.1	CONCLUSIONES	86
4.2	RECOMENDACIONES	87
5	REFERENCIAS	88
6	ANEXOS	97
6.1	ANEXO 1: DISEÑO MECÁNICO DEL USV TIPO TRIMARÁN.....	97
6.2	ANEXO 2: SISTEMA DE MUESTREO DEL USV	98
6.3	ANEXO 3: CONEXIONADO DE SENSORES Y XBEE A LA RASPBERRY PI 4B	99
6.4	ANEXO 4: CONEXIONADO DE ACTUADORES AL RECEPTOR FS-IA10B.....	100
6.5	ANEXO 5: CONEXIONADO DE LA ESTACIÓN REMOTA	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	16
Tabla 2	25
Tabla 3	68
Tabla 4	69
Tabla 5	71
Tabla 6	72
Tabla 7	72
Tabla 8	74
Tabla 9	78
Tabla 10	82
Tabla 11	83
Tabla 12	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	14
Figura 2.....	19
Figura 3.....	20
Figura 4.....	22
Figura 5.....	23
Figura 6.....	24
Figura 7.....	26
Figura 8.....	27
Figura 9.....	29
Figura 10.....	32
Figura 11.....	32
Figura 12.....	36
Figura 13.....	37
Figura 14.....	38
Figura 15.....	39
Figura 16.....	41
Figura 17.....	41
Figura 18.....	42
Figura 19.....	43
Figura 20.....	43
Figura 21.....	44
Figura 22.....	45
Figura 23.....	45
Figura 24.....	46
Figura 25.....	47
Figura 26.....	47
Figura 27.....	48
Figura 28.....	50
Figura 29.....	50
Figura 30.....	51
Figura 31.....	51
Figura 32.....	52

Figura 33.....	52
Figura 34.....	53
Figura 35.....	54
Figura 36.....	55
Figura 37.....	55
Figura 38.....	56
Figura 39.....	57
Figura 40.....	57
Figura 41.....	58
Figura 42.....	59
Figura 43.....	59
Figura 44.....	60
Figura 45.....	61
Figura 46.....	62
Figura 47.....	62
Figura 48.....	63
Figura 49.....	70
Figura 50.....	70
Figura 51.....	75
Figura 52.....	75
Figura 53.....	76
Figura 54.....	76
Figura 55.....	77
Figura 56.....	78
Figura 57.....	79
Figura 58.....	80
Figura 59.....	81
Figura 60.....	81
Figura 61.....	82
Figura 62.....	84

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

El desarrollo de vehículos de superficie no tripulados (USV, por sus siglas en inglés Unmanned Surface Vehicle) presenta un crecimiento significativo desde el año 2015, con un aumento notable en la introducción de nuevos modelos al mercado. Esta tendencia se presenta con el objetivo de suplir necesidades comerciales, científicas y operativas. En consecuencia, los USV avanzaron desde embarcaciones controladas remotamente hasta sistemas autónomos avanzados gracias a los avances tecnológicos en inteligencia artificial, sensores, propulsión y comunicación. Sin embargo, estos vehículos aún presentan limitaciones en autonomía, arquitectura de hardware y software, escalabilidad entre tamaños, fuentes de energía y ciberseguridad (de Andrade et al., 2025).

En este contexto, los USV tienen un alto potencial para el monitoreo de cuerpos de agua, una aplicación clave ante el estado crítico de los recursos hídricos en el Perú. Por ejemplo, Mamani (2024) demostró que las cantidades de plomo y zinc en el lago Chinchaycocha, ubicado en la Reserva Nacional de Junín, excedieron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) debido a operaciones mineras. En consecuencia, la presencia de estos elementos tóxicos afectó la biodiversidad del lago.

Según un estudio realizado por el IMARPE en el marco del Proyecto “Monitoreo Hidrobiológico de los Recursos Hídricos para el Desarrollo de la Acuicultura” refleja la importancia del monitoreo de lagunas altoandinas, ya que la información obtenida permite evaluar, valorizar y determinar zonas con potencial acuícola. Sin embargo, hasta la fecha del estudio se menciona que la región hidrográfica del Amazonas (Atlántico) se han registrado 7441 lagunas, de las cuales 133 se encuentran en estudio, 76 en explotación y 7232 lagunas no cuentan con estudios realizados y tampoco son aprovechadas (Cavero et al., 2020).

En la Agenda de Investigación Ambiental al 2030 (AIA al 2030) se manifiesta que en el Perú se evidencia una precaria articulación entre la ciencia y la toma de decisiones en temas ambientales, lo cual influye en una deficiente gestión del conocimiento ambiental (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2023). Adicionalmente, en la Evaluación de Desempeño Ambiental brindado por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) emitieron entre sus recomendaciones: reforzar acciones orientadas a mejorar y actualizar

el conocimiento científico sobre los ecosistemas, monitorear y notificar periódicamente su estado, y garantizar un adecuado uso sostenible de la biodiversidad (CEPAL & OCDE, 2016, como se cita en MINAM, 2023).

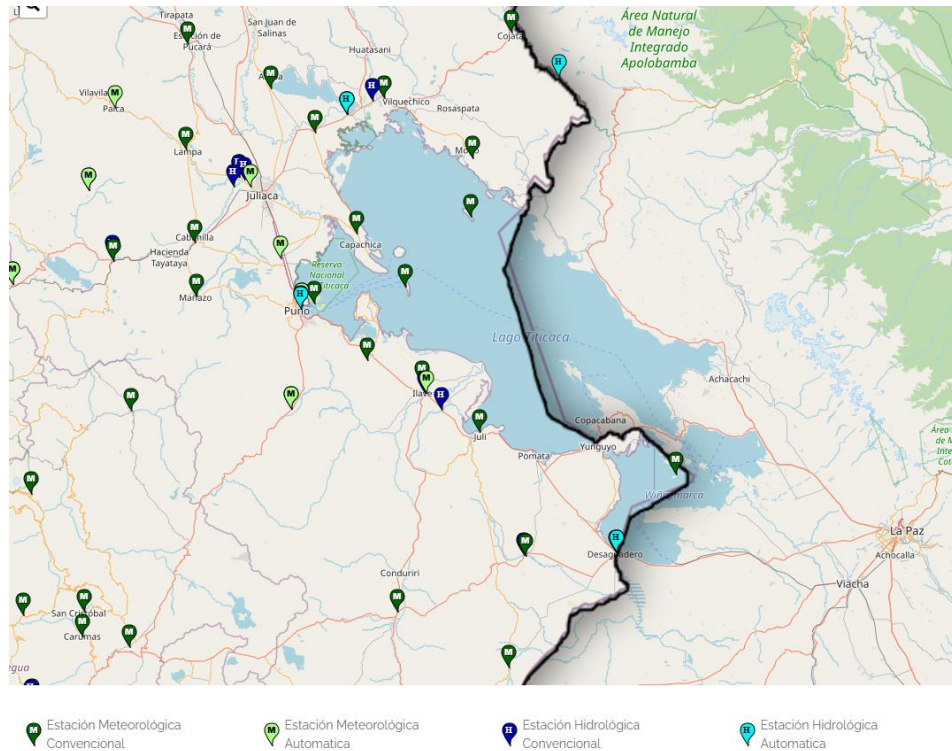
El Programa Cintya (Ciencia, Innovación, Tecnología y Ambiente) plantea que el Perú enfrenta problemáticas ambientales de gran complejidad frente a las cuales la ciencia y la tecnología aún no ofrecen una respuesta suficiente. Por esta razón, es imprescindible desarrollar estudios más profundos que articulen e incentiven la ciencia y la tecnología en sus diferentes ramas, con la finalidad de responder de manera efectiva generando soluciones innovadoras a estos problemas ambientales (Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica [CONCYTEC], 2016).

Según el eje temático de Calidad Ambiental de la AIA al 2030 se busca potenciar la producción de conocimiento y tecnología para controlar el deterioro del ambiente, así como mejorar la calidad del agua en las diferentes unidades hidrográficas del territorio nacional (MINAM, 2023). Asimismo, el eje temático de Gestión de riesgos y adaptación al cambio climático prioriza e impulsa como línea de investigación el Monitoreo del estado y calidad de ecosistemas acuáticos. En consecuencia, resulta prioritario fortalecer el desarrollo de herramientas y metodologías de monitoreo que generen información oportuna y confiable sobre estos ecosistemas.

Además, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2020) posee una red de estaciones para recolectar datos hidrometeorológicos a nivel nacional. Sin embargo, las estaciones hidrológicas del tipo convencional y automática tienen más presencia en los ríos y solo monitorean el nivel del agua. A la vez, en la Figura 1, se puede visualizar que tanto el Lago Titicaca y las lagunas circundantes en su mayoría poseen presencia de estaciones meteorológicas, pero se evidencia la ausencia de estaciones hidrológicas, lo cual refleja la falta de monitoreo de estos cuerpos de agua.

Figura 1

Datos Hidrometeorológicos en el Lago Titicaca



Nota. La imagen muestra los tipos de estaciones meteorológicas e hidrológicas desplegadas en el Lago Titicaca. Adaptado de "Datos Hidrometeorológicos a Nivel Nacional", por SENAMHI, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones>).

La limitada investigación ambiental en el Perú, junto a la ausencia de estaciones hidrológicas en los sistemas lénticos genera un vacío significativo de información disponible sobre calidad de agua en los ecosistemas del territorio nacional.

La reconocida importancia del monitoreo de calidad del agua no se ve reflejada en el método de monitoreo respectivo. Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016), se presentan protocolos para realizar exitosos monitoreos de calidad de agua mediante la adquisición de muestras. Sin embargo, se debe considerar los procedimientos anteriores y posteriores a la labor de recolección de muestras. Por un lado, entre los procesos precedentes se encuentra la planificación del monitoreo, la definición de puntos de toma de muestras, la frecuencia de monitoreo, el establecimiento de los parámetros a evaluar y la preparación de recursos para la actividad como alquiler de equipo de monitoreo, compra de materiales de escritorio, asignación específica de viáticos, etc. Por otro lado,

entre los procedimientos posteriores al monitoreo se encuentra el análisis de muestras, el envío de resultados obtenidos y la elaboración de un informe.

Habiendo descrito brevemente los procesos previos y posteriores, los métodos de monitoreo de agua empleados por las entidades peruanas se caracterizan por el uso de embarcaciones y personal hacia los puntos de monitoreo. Una vez ubicados en los puntos, el personal responsable emplea baldes o frascos con brazos recolectores para obtener agua superficial o una botella hidrográfica para obtener tomas de aguas profundas. Las muestras son almacenadas en frascos de diferentes volúmenes para luego guardarlas según protocolo o analizarlas a la mayor brevedad posible.

Si bien los métodos empleados por la Autoridad Nacional del Agua permiten obtener información sobre la calidad de agua, se observa que un gran esfuerzo logístico para realizar las actividades de manera exitosa. Asimismo, se presentan limitaciones y riesgos al emplear personal para realizar las actividades de recolección de muestras. En este contexto, los vehículos de superficie no tripulados se introducen como una alternativa más sostenible, funcional, confiable y versátil.

Actualmente, existe una variedad de vehículos de superficie no tripulados con el objetivo de monitorear los cuerpos de agua. Por ejemplo, Qadir et al. (2024) desarrollaron un USV radiocontrolado denominado “AquaDrone” para lagos o cuerpos de agua de baja turbulencia. Adicionalmente al monitoreo de coordenadas GPS, el vehículo presenta la capacidad de monitorear los siguientes parámetros básicos: acidez o alcalinidad del agua (pH), oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y temperatura. De manera similar, Diaz (2019) implementó un USV operado a distancia capaz de recolectar una muestra puntual de agua superficial y medir los cuatro parámetros antes mencionados. Análogamente, Balbuena et al. (2017) presentaron un vehículo radiocontrolado apto para realizar mediciones batimétricas y recolectar datos de calidad de agua adicionales a las variables básicas como la turbidez, materia orgánica disuelta (CDOM), salinidad, y sólidos disueltos totales. Balbuena (2017) presenta un catamarán, es decir, un vehículo compuesto por dos cascos, con la capacidad de recolectar muestras de agua mediante un conjunto de botellas Niskin sujetas a una estructura denominada Rack con el objetivo de analizar otros parámetros adicionales a los básicos.

Además de los avances reportados en la literatura científica, diversas compañías comercializan USV orientados al monitoreo de calidad del agua en lagos, cuyas características técnicas se presentan en la Tabla 1. No obstante, tanto los estudios como los modelos disponibles en el mercado se enfocan principalmente en la medición de parámetros básicos, dejando en segundo plano la recolección de muestras de agua y el diseño del casco. En consecuencia, estos vehículos carecen de sistemas que permitan la toma directa de muestras para un análisis más detallado de la calidad del agua.

Tabla 1

Vehículos de superficie no tripulado disponibles en el mercado para monitoreo de calidad del agua en lagos

Fabricante	Modelo	Características	Parámetros medibles	Instrumentos
OceanAlpha	ESM30	Tipo: Catamarán	Temperatura	Sonda multiparámetro
		Dimensiones: 1.5 x 0.8 x 0.43m	pH	
		Peso: 32 kg	Conductividad	
		Carga: 15 kg	Oxígeno disuelto	
		Velocidad crucero: 1 m/s	Turbidez	
			Clorofila	
Open Ocean Robotics	Dataexplorer Enviro	Tipo: Monocasco	Temperatura	Sonda multiparámetro ADCP Cámaras Sensores meteorológicos
		Métodos de medición	Salinidad	
		Dimensiones: 3.7 x 0.9 x 1.8m	pH	
		Peso: 143 kg	Conductividad	
		Carga: 50 kg	Turbidez	
		Velocidad crucero: 1 m/s	Clorofila	
OceanAlpha	ME120	Tipo: Catamarán	Temperatura	Sonda multiparámetro ADCP LIDAR
		Dimensiones: 2.5 x 1.4 x 0.75m	pH	
			Conductividad	
		Peso: 150 kg	Turbidez	

		Carga: 45 kg	Oxígeno	
		Velocidad crucero: 2 m/s	disuelto	
			Profundidad	
			Topografía	
		Tipo: Catamarán	Temperatura	
		Dimensiones: 1.5 x 0.69 x 0.42m	pH	
		Peso: 28kg	Conductividad	Sonda
Bathyrone	Vasco	Carga: 10 kg	Oxígeno disuelto	multiparámetro
		Velocidad Max: 3.6 m/s	Turbidez	ADCP
			Corrientes	
			Topografía	

Nota. Elaborado a partir de OceanAlpha Group Ltd. (2019), Open Ocean Robotics (s.f.), OceanAlpha Group Ltd. (2024) y Vasco (s.f.).

1.2 Descripción de la Organización

Tecnocontrol S.A.C es una empresa peruana establecida en el 2008 cuyas actividades se encuentran orientadas a elaborar, desarrollar e implementar entornos de práctica junto con instrumentos dirigidos a la enseñanza profesional y superior los cuales cumplen rigurosamente con la normativa establecida por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria en Perú (SUNEDU, por sus siglas).

Adicionalmente, Tecnocontrol S.A.C brinda servicios de ingeniería orientadas a la parametrización y programación de Controladores Lógicos Programables (PLC), el desarrollo e implementación de Sistemas de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) aplicados a diversos contextos industriales y de defensa, así como programas de formación especializada en áreas como automatización, control mediante variadores de frecuencia, y afines.

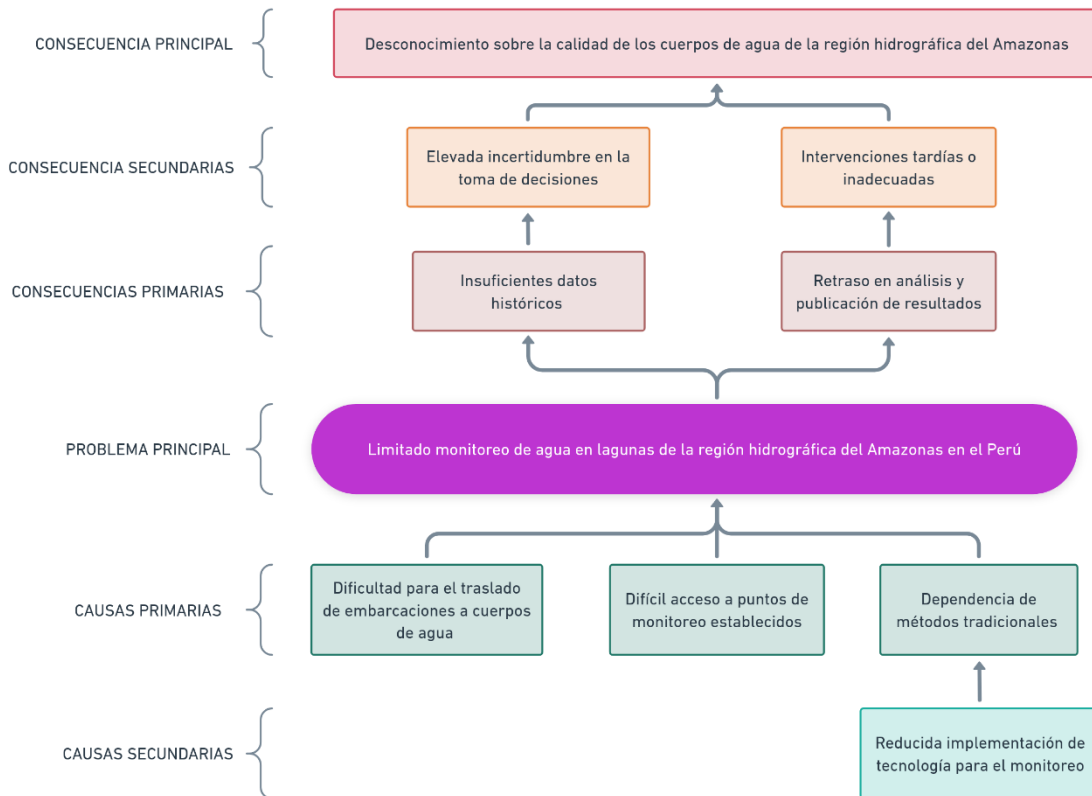
De manera complementaria, la empresa proporciona asesoría técnica en procesos de acreditación de programas académicos de ingeniería. En consecuencia, Tecnocontrol S.A.C fue reconocida por distintas universidades incluyendo la Universidad Nacional de Ingeniería, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, etc.

1.3 Análisis del Problema

En el Perú, los cuerpos lénticos (lagos y lagunas) sostienen el abastecimiento hídrico, la biodiversidad y medios de vida altoandinos y amazónicos, no obstante, su monitoreo ambiental sigue siendo limitado. A nivel nacional, la calidad del agua se evalúa únicamente en 98 unidades hidrográficas de las 159 con las que cuenta el Perú, y más del 40% los resultados de su evaluación no alcanzan los ECA establecidos (MINAM, 2023), lo que evidencia cobertura insuficiente y desempeño desigual de la vigilancia. Este déficit se agrava por el acceso restringido a muchos cuerpos de agua y el difícil acceso a puntos de muestreo establecidos, que obligan a depender de métodos tradicionales con personal embarcado para recolectar muestras (ANA, 2016). Dichos procedimientos, además de exponer a riesgos al personal, resultan lentos y logísticamente complejos (planificación, permisos, equipos, seguridad), lo que reduce la frecuencia y continuidad del seguimiento. Pese a la disponibilidad comercial de USVs para monitoreo in situ, su implementación sigue siendo reducida, particularmente en sistemas con capacidad de recolección de muestras para análisis detallado en laboratorio. Frente a estas limitaciones como el acceso restringido, difícil ingreso a puntos fijos, baja adopción tecnológica, dependencia de métodos convencionales y cobertura limitada, se plantea diseñar un USV tipo trimarán para el monitoreo de cuerpos lénticos de la región hidrográfica del Amazonas en el Perú con la finalidad de mejorar la seguridad operativa, ampliar la cobertura y periodicidad del monitoreo. A continuación, en la Figura 2 se especifican las causas del problema y las consecuencias asociadas.

Figura 2

Árbol de problemas



1.4 Objetivos

1.4.1 General

Diseñar un vehículo de superficie no tripulado tipo trimarán para monitoreo de cuerpos lénticos de la región hidrográfica del Amazonas en el Perú.

1.4.2 Específicos

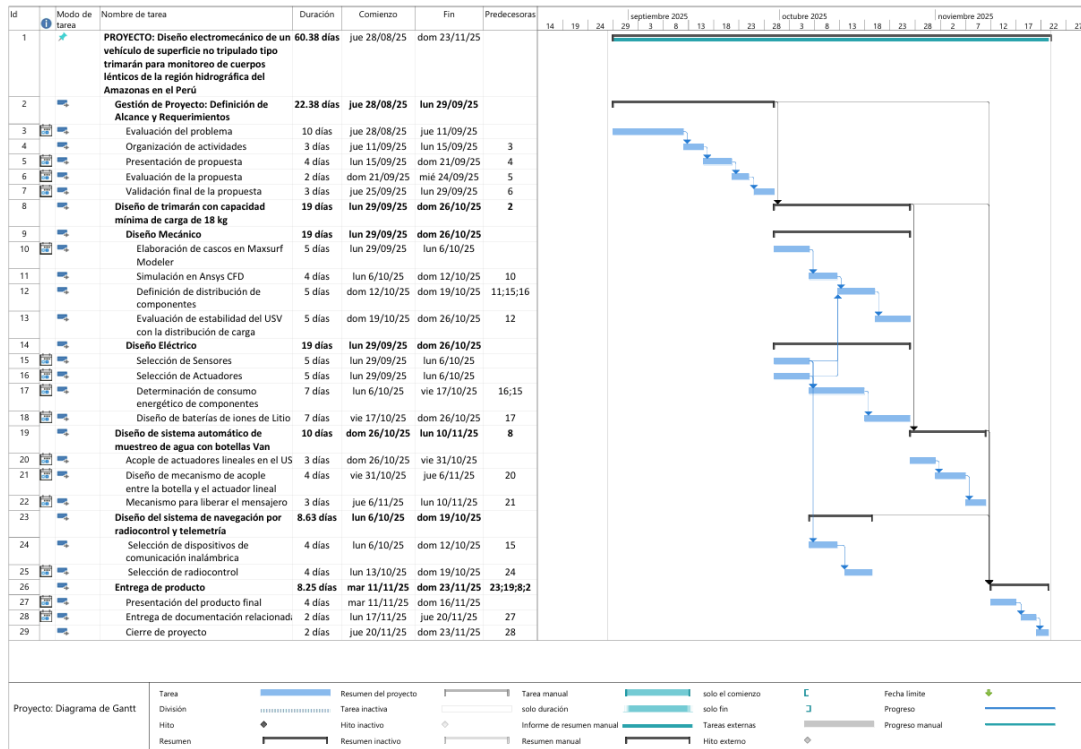
1. Diseñar la estructura del trimarán capaz de transportar una carga útil mínima de 10 kg.
2. Diseñar un sistema para toma de muestras de agua basado en la integración de dos botellas Van Dorn.
3. Diseñar un sistema de monitoreo de agua integrado a la estructura del trimarán.
4. Diseñar el sistema de propulsión y navegación por radiocontrol.

1.5 Planificación del Proyecto

En la Figura 3 se muestra la organización del proyecto mediante un diagrama de Gantt, donde se representan las actividades y su programación en el tiempo.

Figura 3

Diagrama de Gantt



2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Vocabulario

Ancho de Banda: o Anchura de Banda, se refiere al mínimo rango de frecuencias que ocupa una emisión, el cual se considera suficiente para garantizar que la información sea transmitida (Resolución Ministerial 358-2003-MTC/03, 2003).

Aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ICM): comprende el funcionamiento de equipos que utilizan energía radioeléctrica con fines industriales, científicos, médicos, domésticos o similares, pero exceptuando por completo todas las aplicaciones de telecomunicaciones (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2023, p.5).

Babor: “lado izquierdo de la embarcación mirando de popa a proa” (Lee, 2020, p.19).

Botella Van Dorn: es un muestreador de agua horizontal formado por un tubo transparente con tapones en los extremos, que se cierran a la profundidad deseada para recoger muestras en lagos o masas de agua con corrientes o estratificación (Aquatic BioTechnology, 2023).

Calado (T): es la distancia vertical medida desde la cara inferior de la quilla o base de referencia hasta el plano de flotación de referencia (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2020a).

Casco: “cuerpo del buque, sin máquinas, arboladura ni pertrechos” (Lee, 2020, p.40).

Escora: “Inclinación de un barco con respecto a la vertical sobre uno de sus costados por acción del viento sobre las velas, oleaje o por un desplazamiento de pesos” (Lee, 2020, p.68).

Eslora del casco (L_H): es la longitud medida en paralelo al plano de flotación de referencia, desde la parte más a proa de la proyección del casco hasta la parte más a popa. No incluye elementos desmontables, como timones, púlpitos, motores fuera de borda, plataformas abatibles u otros accesorios no estructurales (ISO, 2020a).

Eslora en flotación (LWL): es la longitud de la línea de flotación de referencia, medida en paralelo al plano de flotación (ISO, 2020a).

Eslora máxima (L_{MAX}): es la longitud total del casco medida en paralelo al plano de flotación de referencia, incluyendo cualquier parte estructural fija que sobresalga de la embarcación (ISO, 2020a).

Estribor: “lado derecho de la embarcación mirando de popa a proa” (Lee, 2020, p.72).

Flotador: “objeto de gran flotabilidad incorporado a una estructura con el objetivo de evitar su hundimiento” (Lee, 2020, p.75).

Francobordo (F): es la distancia vertical entre la línea de flotación de referencia y el punto superior de la cubierta en el costado, en la sección transversal considerada (ISO, 2020a).

Línea de flotación (WL): línea de intersección entre el plano de la flotación y el casco cuando la embarcación se encuentra a flote (ISO, 2020a).

Manga del casco (B_H): es la anchura máxima del casco, medida perpendicularmente a la eslora del casco (L_H), sin incluir molduras, defensas ni elementos desmontables (ISO, 2020a).

Manga en flotación (BWL): es la anchura de la embarcación sobre la línea de flotación de referencia, medida perpendicularmente a la eslora en flotación (LWL) (ISO, 2020a).

Manga máxima (B_{MAX}): es la anchura mayor de la embarcación, medida perpendicularmente a la eslora máxima (L_{max}), incluyendo cualquier parte estructural fija (ISO, 2020a).

Ondas Radioeléctricas (Ondas Hertzianas): son “ondas electromagnéticas, cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3000 GHz que se propagan por el espacio sin guía artificial” (MTC, 2023, p.5).

Popa: “parte trasera de la embarcación” (Lee, 2020, p.107).

Proa: “parte delantera de la embarcación” (Lee, 2020, p.108).

Radio: se refiere al “término general que se aplica al empleo de las ondas radioeléctricas” (MTC, 2023, p.5).

Radiocomunicación: es “toda telecomunicación transmitida por medio de las ondas radioeléctricas” (MTC, 2023, p.5).

Radiofrecuencia: conjunto de frecuencias entre 3 kHz y 300 GHz del espectro electromagnético donde operan las ondas de radio (Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association, 2018).

Trimarán: embarcación compuesta por un casco principal y dos cascos secundarios denominados flotadores, conectados por vigas (Mendoza, 2025).

Se presenta en la Figura 4 se muestra la arquitectura de un trimarán.

Figura 4

Arquitectura de un trimarán

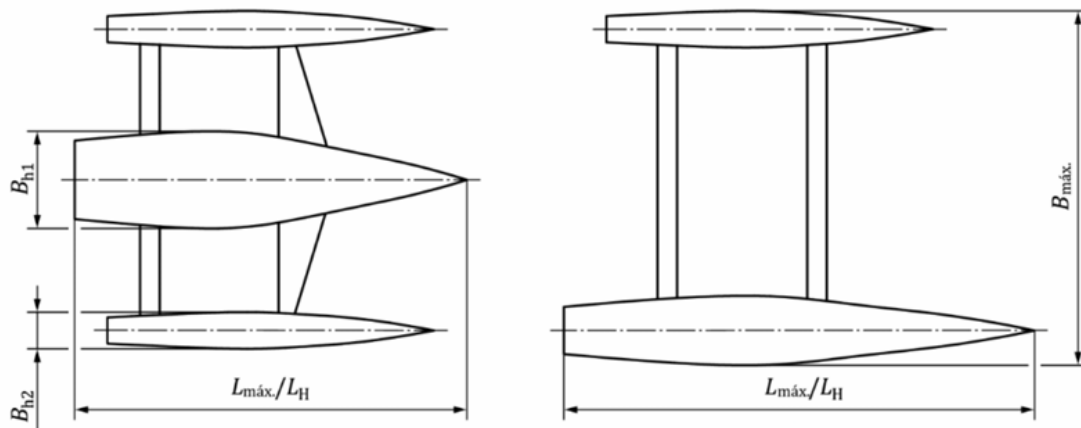


Nota. De “Riverboat SP”, por Teledyne Marine, s.f (<https://www.teledynemarine.com/en-us/products/Pages/riverboat-sp.aspx>).

A continuación, en la Figura 5 se observa una representación esquemática que muestra la forma en que se determinan las dimensiones principales de las embarcaciones multicasco.

Figura 5

Determinación de esloras y mangas en embarcaciones multicasco



Nota. De “ISO 8666:2020. Small craft — Principal data”, por ISO, 2020a (<https://www.iso.org/standard/79071.html>).

2.1.2 Dinámica de fluidos computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) constituye un campo de la ingeniería que combina la mecánica de fluidos con técnicas numéricas para predecir el comportamiento de los flujos y otros fenómenos relacionados, tales como la transferencia de calor, la aeroacústica o las reacciones químicas. Para ello, se emplean ecuaciones de conservación que, al no disponer de soluciones analíticas en la mayoría de los casos prácticos, deben resolverse mediante procesos de discretización, siendo el método de volúmenes finitos uno de los más utilizados ESSS (2016).

2.1.3 Método de volúmenes finitos

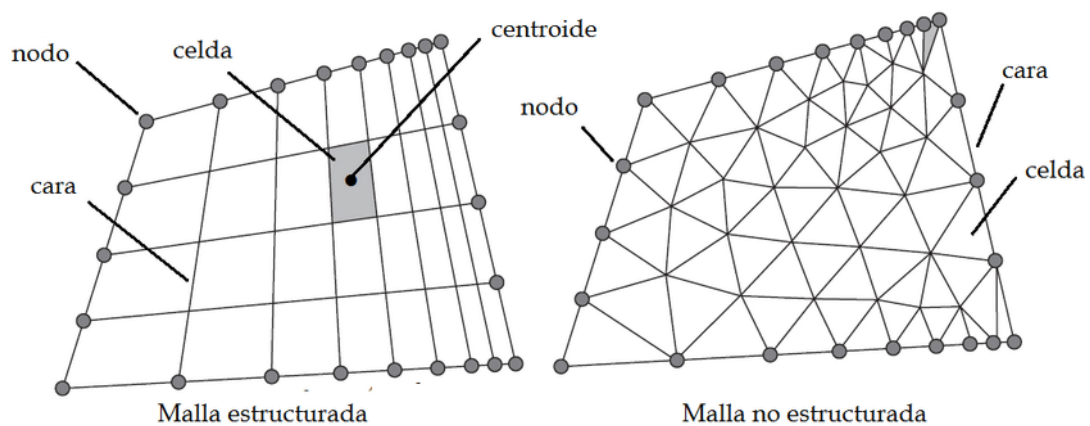
El método de volúmenes finitos (FVM) es una de las técnicas más utilizadas en dinámica de fluidos computacional porque permite resolver las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos de manera precisa y conservativa. Su principio consiste en dividir el dominio de estudio en pequeños volúmenes de control. En cada uno de estos volúmenes se aplican las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, lo que asegura que los balances físicos se respeten tanto local como globalmente. El procedimiento se lleva a cabo en varias etapas: primero, las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo se transforman en ecuaciones algebraicas al integrarlas dentro de cada volumen de control. Luego, las integrales de volumen y de superficie se aproximan mediante esquemas numéricos adecuados. Posteriormente, los valores de las variables en las caras de los volúmenes se calculan a partir de los valores en los nodos cercanos, lo

que permite cerrar el sistema de ecuaciones. Finalmente, este sistema se resuelve mediante métodos iterativos o acoplados, posibilitando la simulación del comportamiento de fluidos en geometrías complejas con la ayuda de software especializado (Osses, 2016).

Con el fin de ilustrar el proceso de discretización del dominio, la Figura 6 muestra la diferencia entre una malla estructurada y una malla no estructurada, las cuales representan las dos configuraciones más comunes en el método de volúmenes finitos. En la primera, las celdas están organizadas de manera regular y ordenada, mientras que en la segunda presentan una distribución irregular que facilita el modelado de geometrías complejas.

Figura 6

Ejemplo de malla estructurada y no estructurada empleada en el método de volúmenes finitos



Nota. De “Estudio numérico de la estabilidad de una película de líquido descendente en el interior de un conducto circular”, por Luis Borraz Jonapa, 2025 (https://www.researchgate.net/publication/335404900_Study_of_the_stability_of_a_falling_liquid_film_with_concurrent_gases_inside_a_circular_duct).

2.1.4 Prueba de asimetría (skewness)

En el proceso de generación de mallas, el skewness es una de las métricas fundamentales para evaluar la calidad de las celdas. Esta medida compara la forma de cada elemento con la de un triángulo o tetraedro equilátero equivalente, indicando su grado de distorsión. Los valores cercanos a cero representan celdas casi ideales, mientras que aquellos próximos a uno reflejan una geometría degenerada (ANSYS, 2025). En la Tabla 2, que resume los rangos de *skewness* y su respectiva clasificación cualitativa para la evaluación de la malla.

Tabla 2*Valores ideales de skewness para la calidad de malla*

Valor de Asimetría	Calidad celular
1	Degenerado
0.9 – <1	Malo
0.75 – 0.9	Pobre
0.5 – 0.75	Aceptable
0.25 – 0.5	Bueno
> 0 – 0.25	Excelente
0	Equilátera

Nota. Adaptado de “ANSYS Meshing User's Guide”, por ANSYS, 2025 (https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=//Views/Secured/corp/v252/en/wb_msh/msh_book_wb.html).

2.1.5 Altura metacéntrica transversal

La altura metacéntrica transversal (GMt) es la distancia vertical entre el centro de gravedad (G) y el metacentro transversal (M). Un valor positivo de GMt indica que el centro de gravedad se encuentra por debajo del metacentro, generando un momento adrizante que permite al casco recuperar su posición de equilibrio después de una escora. En cambio, un valor negativo implica inestabilidad, ya que el buque tendería a volcarse ante perturbaciones transversales. El valor deseable de GMt varía según el tipo, tamaño y servicio de la embarcación, pero en promedio oscila entre 0.04 y 0.06 veces la manga, pudiendo alcanzar hasta 0.10 veces la manga en embarcaciones de alta exigencia estructural, como los buques militares. Este parámetro se utiliza como un índice directo de la estabilidad transversal, y su magnitud influye en la rigidez de los movimientos del barco y en la seguridad general de navegación (Britannica Editors, 2018).

2.1.6 Coeficientes de formas de embarcaciones

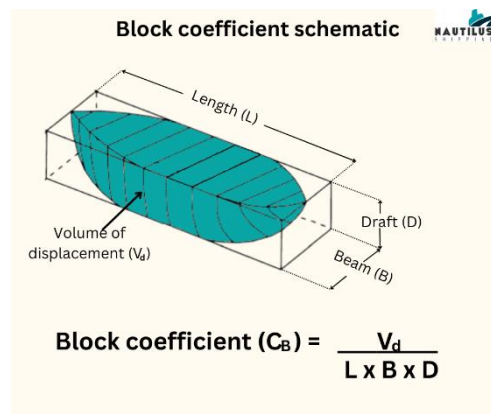
2.1.6.1 Coeficiente de bloque

El coeficiente de bloque cuantifica cuán lleno o voluminoso es un casco frente a un paralelepípedo ideal que lo envuelve. Se define como la razón entre el volumen desplazado del casco y el producto de la eslora efectiva, la manga y el calado (dentro de la parte sumergida). Su valor varía entre 0 y 1: un casco con C_B cercano a 1 se asemeja más a un bloque compacto (como en buques portacontenedores o petroleros), mientras

que un casco con C_B bajo (por ejemplo < 0.7) se considera de forma más esbelta o fina, característico de embarcaciones ligeras y de desplazamiento eficiente. Un C_B bajo implica menos resistencia al avance debido a menor volumen saturado en la forma del casco, mientras que un C_B alto sugiere mayor capacidad interna, pero también mayor resistencia hidrodinámica (Nautilus Shipping, 2023). En la Figura 7 se presenta un esquema que ilustra el coeficiente de bloque, mostrando su definición e interpretación gráfica.

Figura 7

Esquema del coeficiente de bloque



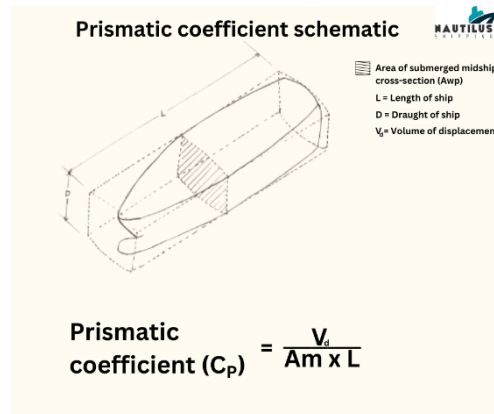
Nota. De “Form Coefficients of Ship – Block, Midship, Waterplane and Prismatic Coefficient”, por Nautilus Shipping, 2023 (<https://nautilusshipping.com/news-and-insights/form-coefficient-of-ship>).

2.1.6.2 Coeficiente prismático

El coeficiente prismático mide cómo se distribuye el volumen sumergido a lo largo de la longitud del casco. Se calcula como la relación entre el volumen desplazado y el producto de la eslora por el área de la sección media sumergida. Un valor elevado de C_p indica que los extremos del casco (proa y popa) son más voluminosos (menos adelgazados), lo cual puede favorecer el comportamiento a velocidades críticas si el casco tiende al planeo. En cambio, un valor bajo sugiere extremos más finos, menor resistencia longitudinal en desplazamiento puro. Para embarcaciones de desplazamiento ligero, los valores típicos de C_p suelen estar entre 0.55 y 0.65 aproximadamente (Nautilus Shipping, 2023). En la Figura 8 se presenta un esquema que ilustra el coeficiente prismático, mostrando su definición e interpretación gráfica.

Figura 8

Esquema del coeficiente prismático



Nota. De “Form Coefficients of Ship – Block, Midship, Waterplane and Prismatic Coefficient”, por Nautilus Shipping, 2023 (<https://nautilusshipping.com/news-and-insights/form-coefficient-of-ship>).

2.2 Estándares, frameworks y buenas prácticas

2.2.1 Estándar ISO 8666:2020. Embarcaciones pequeñas — Datos principales

La Organización Internacional de Normalización es una organización autónoma y no gubernamental que congrega especialistas de distintos sectores para elaborar normas internacionales destinadas a mejorar la seguridad y la calidad de vida (ISO, s.f.). El estándar ISO 8666:2020 define los criterios para la determinación y presentación de los principales datos de las embarcaciones de recreo de hasta 24 metros de eslora, tales como dimensiones, pesos, calados, francobordo y capacidades. Este documento proporciona un marco unificado para la medición y descripción de las características de las embarcaciones, de manera que fabricantes, diseñadores y usuarios utilicen parámetros comunes y comparables (ISO, 2020a).

2.2.2 Estándar ISO 12215-5:2019. Embarcaciones pequeñas – Construcción de casco y escantillones. Parte 5: Presiones de diseño para monocascos, tensiones de diseño, determinación de escantillones

El estándar ISO 12215-5:2019 establece los métodos de cálculo para las presiones de diseño, tensiones admisibles y determinación de dimensiones mínimas en embarcaciones de recreo de hasta 24 metros de eslora, conforme a la ISO 8666. Este documento regula cómo definir los espesores de paneles, disposición de refuerzos y resistencia de uniones del casco, de manera que soporten adecuadamente las cargas derivadas de la operación

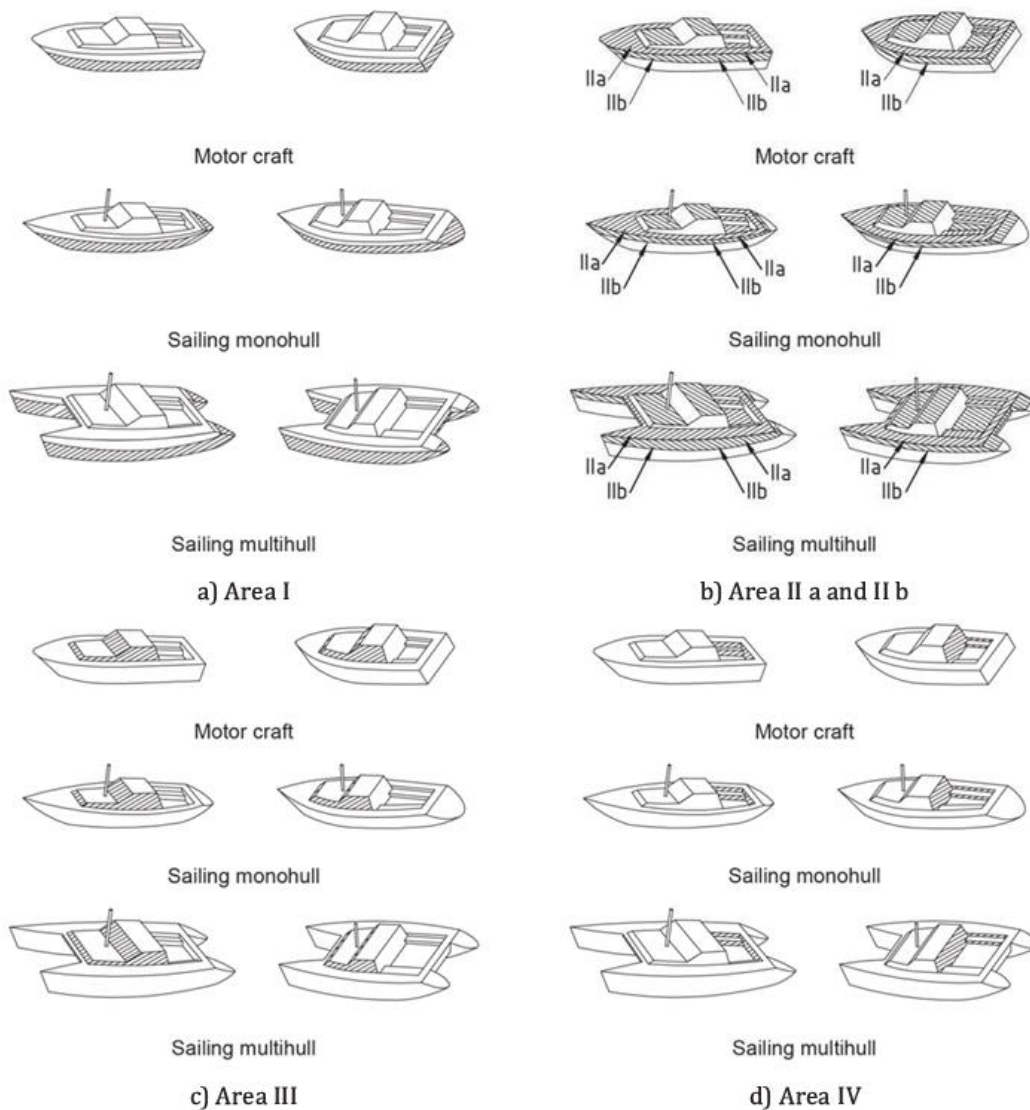
prevista. La norma es aplicable a cascos contruidos en plástico reforzado con fibra, acero, aluminio, madera y configuraciones tipo sándwich, garantizando un nivel mínimo de resistencia estructural y seguridad durante la navegación (ISO, 2019).

2.2.3 Estándar ISO 12216:2020. Embarcaciones pequeñas – Ventanas, portillos, escotillas, tragaluces y puertas – Requisitos de resistencia y estanqueidad.

El estándar ISO 12216:2020 establece los requisitos de resistencia y estanqueidad para los elementos de cierre en embarcaciones de eslora de casco hasta 24 metros, tales como ventanas, portillos, escotillas, tapas estancas y puertas. La norma considera el tipo de embarcación, su categoría de diseño (A, B, C o D) y la ubicación de cada dispositivo dentro del casco o la superestructura. Además, se clasifica las áreas de instalación en cuatro zonas principales (I, IIa, IIb, III y IV), según su exposición al mar, y define grados de estanqueidad que van desde 1 (inmersión continua) hasta 4 (protección contra lluvia o goteo) (ISO, 2020b). En la Figura 9 se puede observar la representación gráfica de dichas zonas principales, donde se ilustran las posiciones típicas de los componentes en función de su ubicación en el casco o la superestructura de la embarcación.

Figura 9

Bocetos de zonas principales de I a IV



Nota. De “ISO 12216:2020. Small craft — Windows, portlights, hatches, deadlights and doors — Strength and watertightness requirements”, por ISO, 2020b (<https://www.iso.org/standard/69553.html>).

2.2.4 Estándar ISO 12217-3:2022. Embarcaciones pequeñas — Evaluación y categorización de la estabilidad y flotabilidad. Parte 3: Embarcaciones con eslora inferior a 6 m

El estándar ISO 12217-3:2022 establece los métodos de evaluación de la estabilidad y flotabilidad en embarcaciones de eslora inferior a 6 metros, con o sin propulsión mecánica, exceptuando multicascos habitables a vela. Este documento permite clasificar las embarcaciones en categorías de diseño C y D, de acuerdo con su carga máxima y

condiciones de operación, en línea con la Directiva Europea 2013/53/UE. La norma contempla pruebas de escora, flotabilidad, recuperación tras vuelco, integridad frente a la entrada de agua y remoción de esta, garantizando un nivel de seguridad adecuado para su uso en aguas expuestas o protegidas según corresponda (ISO, 2022).

2.2.5 Estándar IEC 62133-2:2017. Pilas y baterías secundarias que contienen electrolitos alcalinos u otros electrolitos no ácidos – Requisitos de seguridad para pilas secundarias selladas portátiles y para baterías fabricadas con ellas, para uso en aplicaciones portátiles – Parte 2: Sistemas de litio

Esta norma indica que las celdas de iones de Litio dentro de un pack de baterías no deben estar en contacto directo sin protección (Comisión Electrotécnica Internacional [IEC], 2017). Especifica que las celdas deben estar bien fijadas y separadas para evitar fricción, movimiento o daño durante vibraciones y golpes. Se recomienda usar espaciadores, soportes o material aislante entre celdas. El aislamiento debe impedir cortocircuitos entre carcasa y terminales. Las conexiones en serie/paralelo deben estar diseñadas para evitar desbalance y sobrecarga de una celda. En el caso de celdas cilíndricas (tipo 18650, 21700, etc.) normalmente se dejan con un pequeño espacio entre ellas y se colocan separadores de plástico.

2.3 Bases Legales y Marco Normativo

2.3.1 Resolución Ministerial N.º 237-2023-MINAM

Norma que aprueba la Agenda de Investigación Ambiental al 2030. Esta norma tiene como propósito orientar y racionalizar el uso de los recursos científicos y tecnológicos hacia la atención de los problemas de mayor relevancia en concordancia con las necesidades ambientales previamente identificadas (Resolución Ministerial 237-2023-MINAM, 2023).

2.3.2 Decreto Supremo N.º 023-2021-MINAM

Teniendo en cuenta el Decreto Supremo 023-2021-MINAM (2021) mediante el cual se aprueba la Política Nacional del Ambiente al 2030, la cual reconoce la débil gobernanza ambiental como uno de los principales problemas y propone, como alternativa de solución, fortalecer los sistemas de gestión del conocimiento ambiental en las entidades públicas y la articulación entre distintos niveles de gobierno, con el fin de facilitar una toma de decisiones más adecuada.

2.3.3 Resolución Ministerial N.º 121-2022-MINAM

El artículo 1 de la Resolución Ministerial 121-2022-MINAM (2022) establece los 9 ejes temáticos de investigación ambiental para el periodo 2022 al 2030, en concordancia con los lineamientos de la Política Nacional del Ambiental al 2030. Estos ejes temáticos de investigación ambiental son la base para la elaboración de la Agenda de Investigación Ambiental al 2030.

2.3.4 Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA

Se aprueba el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales con el objetivo de unificar y ordenar la forma en que se realizan los procedimientos técnicos de monitoreo, tanto en aguas continentales como en los sistemas marino-costeros (Resolución Jefatural 010-2016-ANA, 2016).

2.3.5 Decreto Supremo N.º 020-2007-MTC

Teniendo en cuenta el Decreto Supremo 020-2007-MTC (2007) se aprueba el Texto Único Ordenado (TUO) del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones. Es la norma reglamentaria que organiza y detalla cómo deben funcionar legal y técnicamente las telecomunicaciones en el Perú. Se utiliza como referencia obligatoria para el Estado, las empresas operadoras y cualquiera que quiera utilizar el espectro de forma formal y regulada.

2.3.6 Resolución Ministerial N.º 0597-2023-MTC/01.03

Se aprueba el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF) y Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias del Perú. Establece que la banda comprendida entre 2400 a 2500 MHz se encuentra destinada a aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ICM) y es de completa obligación aceptar interferencias de dichas aplicaciones (Resolución Ministerial 0597-2023-MTC/01.03, 2023).

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el diseño mecánico y eléctrico del USV, se tomará como referencia principal una versión preliminar construida a escala real, la cual servirá como base para el análisis y optimización del modelo final. Se observa en la Figura 10 una vista del USV preliminar durante las pruebas estáticas sin la instalación de sensores, mientras que en la Figura 11 se aprecia el mismo prototipo en navegación con los sensores incorporados.

Figura 10

Prototipo preliminar del USV a escala real sin sensores instalados



Figura 11

Prototipo preliminar del USV navegando con sensores integrados



Previo al diseño del nuevo USV, se realizó una revisión de los aspectos críticos identificados en la versión preliminar, con el fin de corregir las deficiencias detectadas. En primer lugar, se comprobó que las dimensiones generales de la embarcación resultaban insuficientes para la carga útil prevista de 10 kg, por lo que este objetivo no llegó a cumplirse en el prototipo inicial. Asimismo, la distribución del peso fue inadecuada: la ubicación de los componentes generó un francobordo de 20 mm, valor muy reducido y poco seguro para la operación. Adicionalmente, las proporciones de los compartimientos internos resultaron excesivamente angostas, dificultando la instalación de la batería y de

otros componentes, situación directamente asociada a las limitaciones dimensionales de la embarcación. Finalmente, se identificaron oportunidades de mejora en la configuración de los brazos de conexión estructural entre el casco principal y los flotadores laterales, lo que justificó el rediseño integral del nuevo USV.

Los requisitos establecidos para la embarcación consideran, de manera prioritaria, una capacidad de carga mínima de 10 kilogramos, una autonomía operativa de 120 minutos, y un alcance de control remoto de 200 metros, valores que servirán como parámetros base para el dimensionamiento estructural, eléctrico y de comunicación del nuevo diseño del USV.

Si bien las normas internacionales de la serie ISO para pequeñas embarcaciones están orientadas principalmente al diseño y evaluación de embarcaciones tripuladas de hasta 24 metros de eslora, sus lineamientos constituyen una referencia técnica válida para el desarrollo de USVs a escala reducida.

En el presente proyecto, las normas internacionales de la serie ISO se adoptan como guía metodológica para garantizar que el diseño cumpla con criterios reconocidos internacionalmente en materia de estabilidad, flotabilidad y resistencia estructural. De este modo, se busca asegurar que el prototipo mantenga un comportamiento hidrostático y estructural similar al de una embarcación convencional de categoría D (aguas protegidas), tal como se establece en la ISO 12217-3:2022.

3.1 Diseño de la Solución

3.1.1 Diseño mecánico

3.1.1.1 Requisitos y condiciones operativas

El proceso de diseño mecánico del USV se orienta a desarrollar una embarcación ligera, estable y resistente, capaz de operar por radiofrecuencia en cuerpos de agua lénticos (lagos y lagunas).

De acuerdo con la ISO 12215-5:2019, la estructura del casco de embarcaciones construidas en materiales compuestos o tipo sándwich debe proporcionar resistencia mecánica, rigidez y estanqueidad acordes con su categoría de diseño. En el trimarán USV propuesto se empleará una arquitectura sándwich con núcleo de madera balsa de 2 mm, recubierto en ambas caras por laminados de fibra de vidrio de 1 mm impregnados con resina epoxi de 0.2 mm por lado. El espesor total del panel resultante es de 4.4 mm.

El conjunto será completamente sellado e impermeabilizado. Asimismo, tomando como referencia las recomendaciones de buenas prácticas recogidas en dicha norma, los cascos se conciben para satisfacer los criterios de integridad estructural, rigidez y flotabilidad positiva asociados a la categoría de diseño D, correspondiente a embarcaciones que operan en aguas protegidas.

Según la ISO 12216:2020, para embarcaciones de categoría de diseño D se exige un grado mínimo de estanqueidad 4 en las aberturas situadas en las áreas II, III y IV, correspondientes a cubiertas y compartimientos con menor exposición directa al oleaje. Este grado de estanqueidad proporciona protección frente a la caída de gotas de agua (lluvia o goteo), sin requerir resistencia frente a inmersión temporal o continua. En consecuencia, los componentes estructurales que cierran dichos compartimientos deben disponer de cierre positivo y de juntas de sellado de material elastómero (por ejemplo, goma o silicona) que eviten una entrada significativa de agua bajo lluvia.

Asimismo, la norma permite el empleo de materiales ligeros como policarbonato (PC), acrílico (PMMA) o plástico reforzado con fibra de vidrio (GRP) para las tapas y registros, siempre que se respeten los espesores mínimos establecidos en la propia ISO 12216, que para placas monolíticas en categoría C–D se sitúan, a modo de referencia, en torno a 4 mm para PC/PMMA en áreas III y IV, y entre 2 y 3 mm para ciertos laminados de GRP, sin necesidad de recurrir a refuerzos metálicos adicionales.

De acuerdo con la ISO 12217-3:2022, para una embarcación de categoría de diseño D se requiere que, en las condiciones de evaluación de estabilidad y flotabilidad, la unidad disponga de flotación suficiente incluso en caso de inundación, mantenga un francobordo residual no inferior a 0.10 m y presente una estabilidad transversal adecuada; cuando se emplean elementos de flotación, estos deben ser de tipo cerrado y de baja absorción de agua.

Para orientar el diseño del trimarán propuesto hacia estos criterios, se adopta un francobordo estático superior a 0.10 m en la condición de carga máxima (verificado mediante análisis hidrostático en ANSYS), se incorpora espuma de poliuretano de celdas cerradas en los espacios huecos del casco para asegurar flotación positiva en caso de inundación y se concentra la masa de baterías, electrónica y propulsores en las posiciones más centrales y bajas posibles, con el

fin de mantener el equilibrio transversal y el centro de gravedad próximo al plano diametral. Estas medidas buscan que el casco mantenga un nivel de seguridad y funcionalidad compatible con los requisitos de estabilidad y flotación establecidos para embarcaciones de categoría D en entornos acuáticos protegidos.

Cabe señalar que no se realizan los ensayos normalizados de estabilidad y flotación definidos en la ISO 12217-3, ya que dichos ensayos requieren la ejecución de pruebas físicas sobre una embarcación construida, lo cual excede el alcance del presente trabajo centrado en el diseño y análisis preliminar; no obstante, estos criterios, junto con la experiencia obtenida en el funcionamiento del prototipo preliminar, se han considerado como referencia para el diseño del trimarán.

3.1.1.2 Definición de dimensiones principales

Para el diseño del USV, se establecieron las dimensiones principales considerando los criterios de medición definidos por la ISO 8666:2020, a fin de garantizar uniformidad en el modelado hidrostático y estructural.

Para fijar las dimensiones se partió del desempeño del prototipo predecesor y se realizaron iteraciones geométricas hasta satisfacer la carga a transportar. Como restricción logística, se exigió que el USV pudiera ingresar en la bodega de una van comercial.

A modo de referencia, la Nissan NV350 Urvan declara un ancho interior de carga cercano a 1.55 m y una longitud útil alrededor de 2.86 m (Nissan Africa, 2025). En consecuencia, esto acotó la manga y eslora máximas del conjunto y justificó las dimensiones finalmente adoptadas.

El prototipo presenta aproximadamente una eslora total de 1.56 m y una manga total de 1.40 m, dimensiones definidas con el propósito de maximizar la estabilidad transversal sin comprometer la maniobrabilidad del conjunto. El casco central cuenta con una eslora de 1.50 m, manga de 0.30 m y altura total de 0.32 m, mientras que los flotadores laterales poseen una eslora de 1.0 m, manga de 0.20 m y altura de 0.25 m, manteniendo una cubierta superior alineada entre los tres cascos para garantizar uniformidad estructural y estética.

El calado de diseño se fijó en 0.15 m para el casco principal y 0.08 m para los flotadores, lo que proporciona un francobordo efectivo aproximado de 0.17 m en el casco central.

Este valor se adopta como margen superior al francobordo residual mínimo de 0.10 m asociado a la categoría de diseño D de la ISO 12217-3, y se considera adecuado para la operación en aguas protegidas. Estas proporciones aseguran una relación equilibrada entre peso, flotabilidad y resistencia al avance, manteniendo la ligereza del conjunto y permitiendo una operación segura y eficiente en cuerpos de agua lénticos.

3.1.1.3 Modelado del casco en Maxsurf

El casco principal y los flotadores laterales fueron diseñados mediante el software de arquitectura naval Maxsurf Modeler, a partir de las dimensiones previamente definidas. Esta configuración trimarán busca optimizar la estabilidad transversal del conjunto, manteniendo una estructura ligera y equilibrada para la operación en aguas protegidas.

De forma individual, el casco principal presenta un comportamiento de desplazamiento fino y estable, adecuado para la navegación en cuerpos de agua lénticos. En la Figura 12 y la Figura 13 se muestran, respectivamente, el modelo tridimensional del casco principal y los resultados hidrostáticos calculados para la línea de flotación de diseño ($DWL = 0.15$ m), correspondientes a la condición de equilibrio bajo carga máxima.

Figura 12

Modelo tridimensional del casco principal obtenido en Maxsurf Modeler

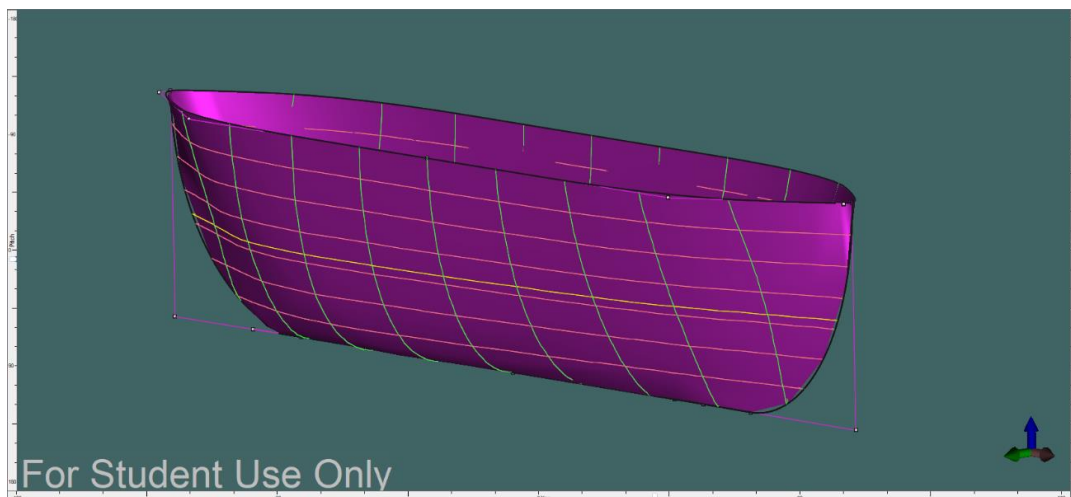


Figura 13

Resultados hidrostáticos obtenidos para el casco principal del USV

Measurement	Value	Units
1 Displacement	0.0279	t
2 Volume (displaced)	0.028	m ³
3 Draft Amidships	0.150	m
4 Immersed depth	0.150	m
5 WL Length	1.421	m
6 Beam max extents on WL	0.263	m
7 Wetted Area	0.496	m ²
8 Max sect. area	0.029	m ²
9 Waterpl. Area	0.259	m ²
10 Prismatic coeff. (Cp)	0.626	
11 Block coeff. (Cb)	0.504	
12 Max Sect. area coeff. (Cm)	0.734	
13 Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.692	
14 LCB length	-0.056	from zero pt. (+ve fwd) m
15 LCF length	-0.038	from zero pt. (+ve fwd) m
16 LCB %	-3.942	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
17 LCF %	-2.688	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
18 KB	0.122	m
19 KG fluid	0.150	m
20 BMt	0.093	m
21 BML	1.091	m
22 GMt corrected	0.015	m
23 GML	1.032	m
24 KMt	0.135	m
25 KML	1.182	m
26 Immersion (TPc)	0.003	tonne/cm
27 MTc	0.000	tonne.m
28 RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	0.000	tonne.m
29 Length:Beam ratio	5.402	
30 Beam:Draft ratio	1.749	
31 Length:Vol*0.333 ratio	4.864	
32 Precision	Medium	65 stations

Density (water)

Std. densities

VCG

Los resultados muestran un desplazamiento total de 0.0279 t, equivalente a 27.9 kg, y un volumen desplazado de 0.028 m³, valores que representan el peso total que el casco puede soportar, incluyendo tanto su estructura como la carga útil instalada, sin comprometer el francobordo.

Los coeficientes de forma obtenidos ($C_B = 0.504$, $C_p = 0.626$) caracterizan un casco de desplazamiento fino y eficiente, coherente con embarcaciones diseñadas para baja velocidad y estabilidad en aguas tranquilas, de acuerdo con Nautilus Shipping (2023).

Según Britannica Editors (2018), el valor óptimo de la altura metacéntrica transversal (GMt) debe encontrarse entre 0.04 y 0.06 veces la manga del casco. Dado que la manga del casco principal es de 0.30 m, el rango recomendado se ubica entre 0.012 m y 0.018 m. El valor obtenido en la simulación, $GMt = 0.015$ m, se encuentra dentro de dicho intervalo, lo que indica una estabilidad inicial adecuada y satisfactoria para las condiciones de operación previstas.

En conjunto, los resultados son coherentes con los criterios de flotabilidad y estabilidad establecidos para embarcaciones de categoría D, conforme a la norma ISO 12217-3:2022.

Por otro lado, los flotadores laterales exhiben un comportamiento hidrostático estable. Estos elementos fueron diseñados para ofrecer una flotabilidad auxiliar y reducir la escora durante la navegación, manteniendo una línea de flotación uniforme con el casco principal. En la Figura 14 y la Figura 15 se presentan, respectivamente, el modelo tridimensional del flotador y los resultados hidrostáticos obtenidos para la línea de flotación de diseño (DWL = 0.08 m), correspondiente a la condición de carga máxima.

Figura 14

Modelo tridimensional del flotador obtenido en Maxsurf Modeler

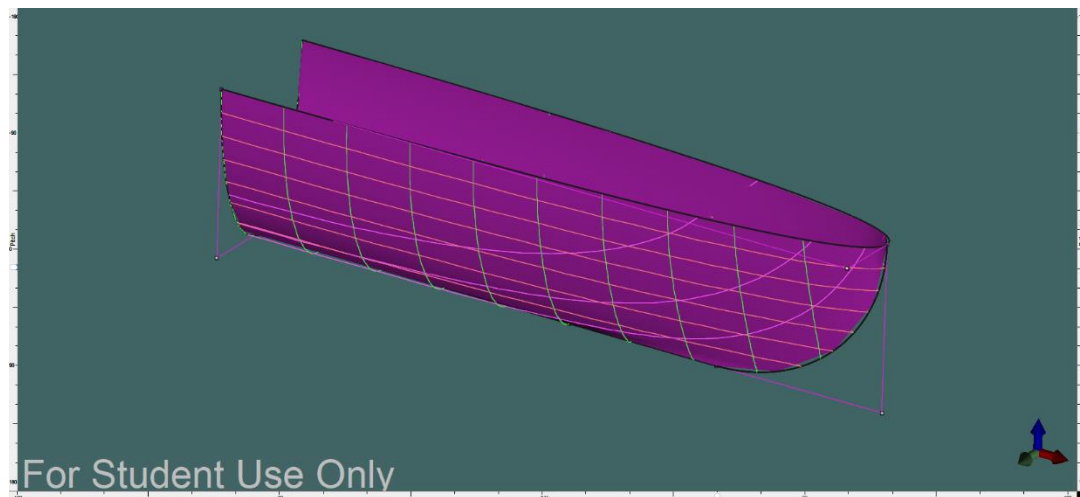


Figura 15

Resultados hidrostáticos obtenidos para el flotador del USV

Measurement	Value	Units
1 Displacement	0.0062	t
2 Volume (displaced)	0.006	m ³
3 Draft Amidships	0.080	m
4 Immersed depth	0.080	m
5 WL Length	0.929	m
6 Beam max extents on WL	0.147	m
7 Wetted Area	0.179	m ²
8 Max sect. area	0.008	m ²
9 Waterpl. Area	0.100	m ²
10 Prismatic coeff. (Cp)	0.647	
11 Block coeff. (Cb)	0.475	
12 Max Sect. area coeff. (Cm)	0.691	
13 Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.735	
14 LCB length	-0.150	from zero pt. (+ve fwd) m
15 LCF length	-0.128	from zero pt. (+ve fwd) m
16 LCB %	-16.151	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
17 LCF %	-13.835	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
18 KB	0.049	m
19 KG fluid	0.080	m
20 BMt	0.026	m
21 BML	1.059	m
22 GMt corrected	0.009	m
23 GML	1.028	m
24 KMt	0.074	m
25 KML	1.108	m
26 Immersion (TPc)	0.001	tonne/cm
27 MTc	0.000	tonne.m
28 RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	0.000	tonne.m
29 Length:Beam ratio	6.336	
30 Beam:Draft ratio	1.832	
31 Length:Vol*0.333 ratio	5.370	
32 Precision	Medium	59 stations

Density (water) 1 tonne/m³

Std. densities 1 tonne/m³ - Std. Metric fresh water (1000.0 kg/m³)

VCG 0 m

Recalculate

Select Rows... Close

Los resultados obtenidos muestran un desplazamiento total de 0.0062 t, equivalente a 6.2 kg, y un volumen desplazado de 0.006 m³, valores que representan el peso total que cada flotador puede soportar, considerando tanto su estructura como la carga útil correspondiente, sin comprometer el francobordo. Cada flotador aporta una flotabilidad equivalente a aproximadamente el 20 % de la capacidad total del casco principal, contribuyendo al equilibrio transversal del conjunto.

Los coeficientes de forma obtenidos ($C^B = 0.475$, $C_p = 0.647$) caracterizan un casco de desplazamiento fino y eficiente, típico de embarcaciones diseñadas para bajas velocidades y alta estabilidad en aguas tranquilas, de acuerdo con Nautilus Shipping (2023).

Asimismo, según Britannica Editors (2018), el valor óptimo de la altura metacéntrica transversal (GMt) debe situarse entre 0.04 y 0.06 veces la manga del casco. Considerando que la manga del flotador es de 0.20 m, el rango recomendado se ubica entre 0.008 m y 0.012 m. El valor obtenido, GMt = 0.009 m, se encuentra dentro de dicho intervalo, lo

que evidencia una estabilidad inicial adecuada y satisfactoria para las condiciones operativas previstas.

En conjunto, los resultados son coherentes con los criterios de flotabilidad y estabilidad definidos para embarcaciones de categoría D, conforme a la norma ISO 12217-3:2022.

3.1.1.4 Simulación CFD

La simulación computacional de fluidos se realizó de manera individual para el casco principal y los flotadores laterales, con el fin de analizar el comportamiento hidrodinámico de cada componente por separado. En ambos casos, se aplicó el principio de simetría respecto al plano longitudinal, por lo que el modelo empleado en ANSYS corresponde únicamente a la mitad de cada casco. De esta manera, los resultados obtenidos representan el comportamiento de la mitad de la embarcación, permitiendo reducir significativamente el número de elementos de malla y, en consecuencia, el tiempo de simulación.

El método requiere que las superficies del casco sean sólidas y completamente cerradas, de modo que puedan ser interpretadas como volúmenes en el entorno de simulación. Para ello, los modelos tridimensionales generados en Maxsurf fueron exportados a Fusion 360, donde se procedió al cierre de superficies y verificación de continuidad geométrica. Posteriormente, los modelos se exportaron en formato “.sat”, lo que garantiza una lectura precisa del volumen durante su importación en ANSYS y evita errores de mallado en las zonas de curvatura del casco.

La aplicación del plano de simetría en el eje longitudinal permite reproducir el flujo de manera fiel alrededor del eje central, manteniendo las condiciones de contorno equivalentes a las de un modelo completo y optimizando el tiempo de simulación al reducir el número total de elementos. En la Figura 16 y la Figura 17 se presenta la configuración del dominio fluido definida en ANSYS 2023 R1, correspondiente a la mitad del casco principal y de uno de los flotadores laterales, respectivamente. Ambos modelos fueron seccionados a lo largo del plano XY para la ejecución de la simulación, aplicando el principio de simetría con el fin de optimizar el cálculo numérico y reducir el tiempo de procesamiento.

Figura 16

Dominio fluido y plano de simetría aplicado al casco principal en ANSYS

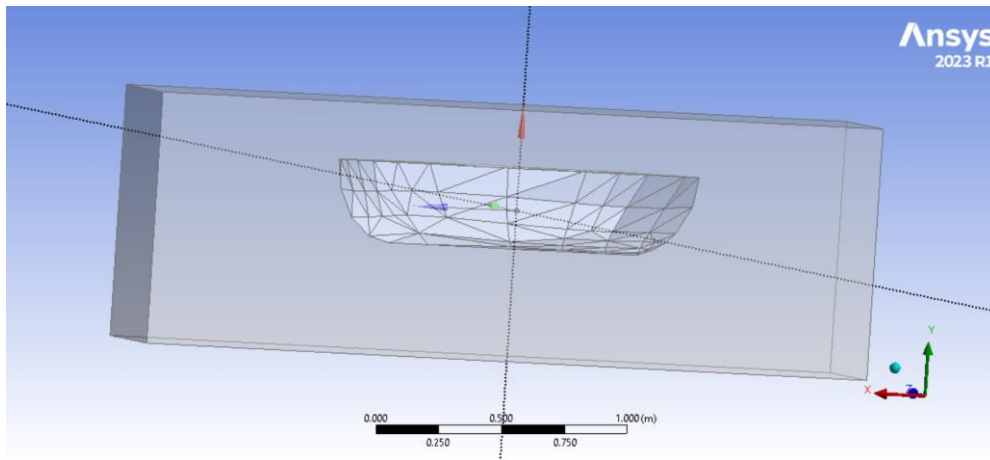
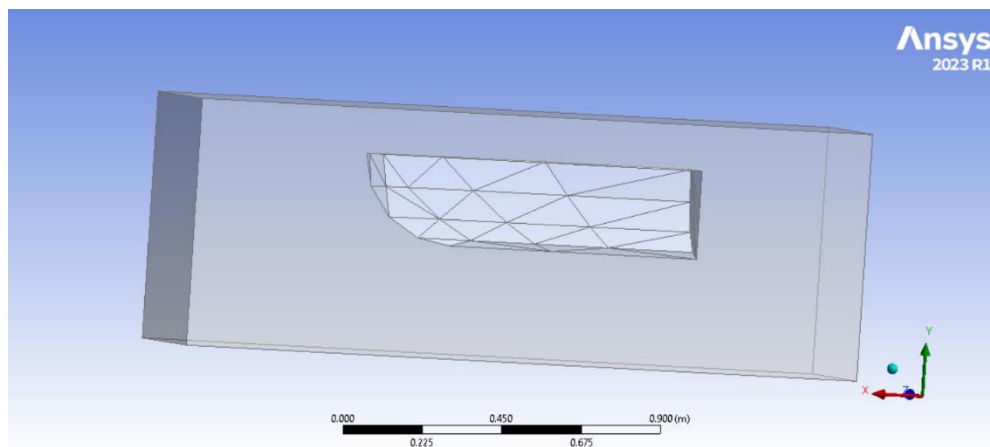


Figura 17

Dominio fluido y plano de simetría aplicado al flotador lateral en ANSYS



Durante la configuración del mallado en ANSYS Fluent, se optó por emplear el método tetraédrico, dado que la complejidad geométrica y las curvaturas del casco del USV requieren una malla capaz de adaptarse con mayor precisión a las superficies tridimensionales del modelo. Este tipo de mallado permite un ajuste eficiente en zonas de contorno irregular, evitando discontinuidades y garantizando la correcta representación del dominio fluido.

Adicionalmente, se definió un *body of influence*, entendido como un volumen auxiliar dentro del dominio fluido que indica al generador de malla dónde concentrar elementos más pequeños. En este caso, dicho volumen se ubicó únicamente en la región próxima al casco donde se esperan mayores gradientes de velocidad y presión, de modo que se

obtuvo un mallado más fino en esa zona de interés sin incrementar de forma excesiva el número total de celdas.

Asimismo, se habilitó la evaluación de calidad de malla para ejecutar la prueba de *skewness*, la cual permite verificar el grado de distorsión de los elementos y, por ende, la precisión y estabilidad del cálculo numérico. En la Figura 18 y la Figura 19 se presentan las características del mallado generadas para el casco principal y el flotador lateral, respectivamente, junto con los valores obtenidos en la prueba de *skewness*, los cuales se mantienen dentro de los rangos aceptables para garantizar una simulación confiable y convergente.

Figura 18

Características del mallado del casco principal

Details of "Mesh"	
<input type="checkbox"/> Display	
Display Style	Use Geometry Setting
<input type="checkbox"/> Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	8.e-003 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
<input checked="" type="checkbox"/> Sizing	
<input type="checkbox"/> Quality	
Check Mesh Quality	Mesh Quality Worksheet
<input type="checkbox"/> Target Skewness	0.9
Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	2.4019e-005
<input type="checkbox"/> Max	0.73555
<input type="checkbox"/> Average	0.21703
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11558
<input checked="" type="checkbox"/> Inflation	
<input checked="" type="checkbox"/> Advanced	
<input type="checkbox"/> Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	991328
<input type="checkbox"/> Elements	5425992
Show Detailed Statistics	No

Figura 19

Características del mallado del flotador lateral

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	2.e-002 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
[+] Sizing	
[-] Quality	
Check Mesh Quality	Mesh Quality Worksheet
<input type="checkbox"/> Target Skewness	0.9
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	4.3485e-004
<input type="checkbox"/> Max	0.74593
<input type="checkbox"/> Average	0.22746
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.11836
[+] Inflation	
[+] Advanced	
[-] Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	49683
<input type="checkbox"/> Elements	257486
Show Detailed Statistics	No

Los valores obtenidos en la prueba de *skewness* fueron de 0.73 y 0.74 para el casco principal y el flotador lateral, respectivamente. De acuerdo con los rangos de referencia de calidad de malla establecidos por ANSYS, valores de *skewness* comprendidos entre 0.25 y 0.75 se consideran dentro del nivel aceptable, garantizando que los elementos presentan una distorsión moderada y que los resultados numéricos mantendrán estabilidad y precisión. Por lo tanto, ambos modelos se consideran válidos para la ejecución de la simulación numérica, cumpliendo los requisitos mínimos de calidad geométrica exigidos por el método de los volúmenes finitos (FVM). En la Figura 20 y la Figura 21 se ilustran los mallados finales aplicados al casco principal y al flotador lateral, respectivamente.

Figura 20

Mallado tetraédrico del casco principal

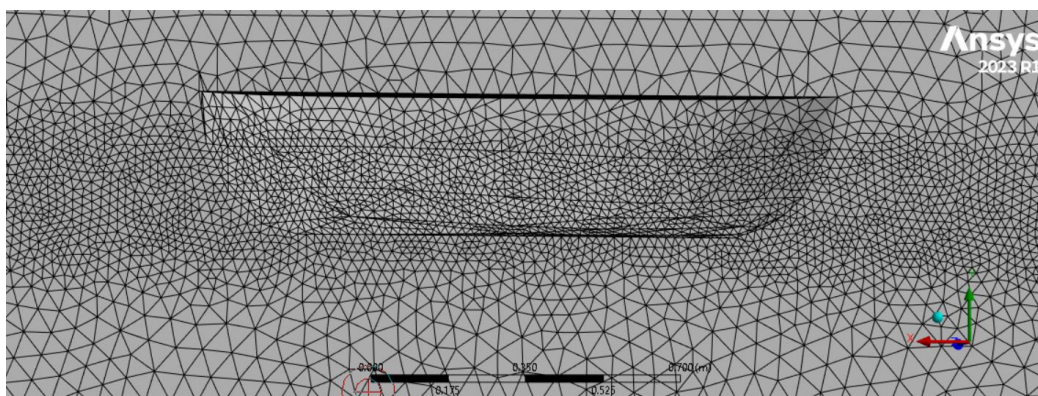
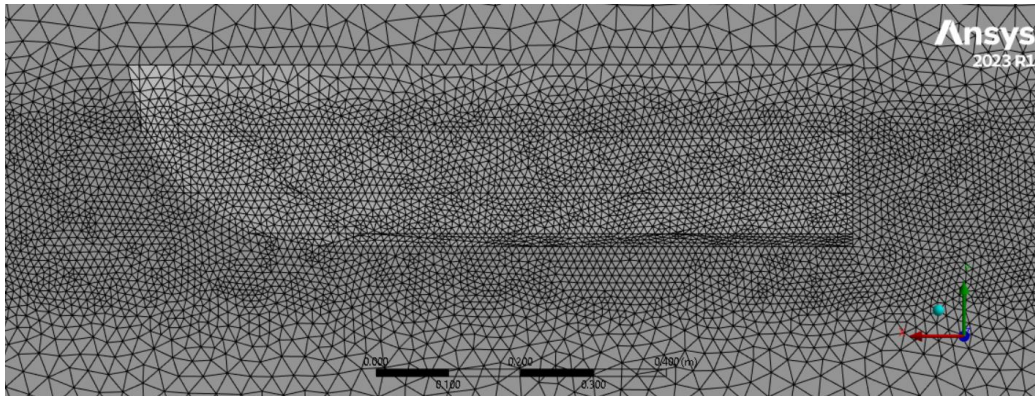


Figura 21

Mallado tetraédrico del flotador lateral



Durante el proceso de mallado se comprobó que un refinamiento excesivo no garantiza necesariamente una mejora en la calidad de la malla ni una disminución del valor de *skewness*. La calidad depende fundamentalmente de la forma, orientación y continuidad de los elementos, más que de su tamaño. Un mallado demasiado fino puede incrementar de forma significativa el número de celdas, generando mayor demanda computacional. En consecuencia, se identificó la importancia de lograr un equilibrio entre la densidad de elementos y la calidad geométrica, priorizando que los parámetros de *skewness* y ortogonalidad se mantengan dentro de los rangos aceptables establecidos por ANSYS (2025) para obtener resultados numéricamente estables y confiables.

El mallado validado se utilizó para la ejecución de la simulación CFD, considerando las condiciones propias del entorno operativo del USV. Se definió una densidad del agua dulce de 1000 kg/m^3 , correspondiente a cuerpos lénticos como lagos y lagunas, donde las corrientes naturales presentan velocidades bajas o prácticamente nulas. Según Rosales & Blanco (2019), en el lago Titicaca se han reportado velocidades superficiales promedio menores a 0.10 m/s . No obstante, con el propósito de evaluar el comportamiento del casco frente a un flujo incidente más exigente que el típico, se aplicó una corriente en contra de 0.50 m/s , valor conservador para condiciones moderadas de operación.

Asimismo, se estableció un mínimo de 1000 iteraciones en el proceso de cálculo, con el fin de asegurar la convergencia numérica y la obtención de resultados estables en las variables de presión, velocidad y fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el casco. En la Figura 22 y la Figura 23 se presentan los resultados de la simulación hidrodinámica correspondientes al casco principal y al flotador lateral, respectivamente.

Figura 22

Resultado de la simulación hidrodinámica del casco principal

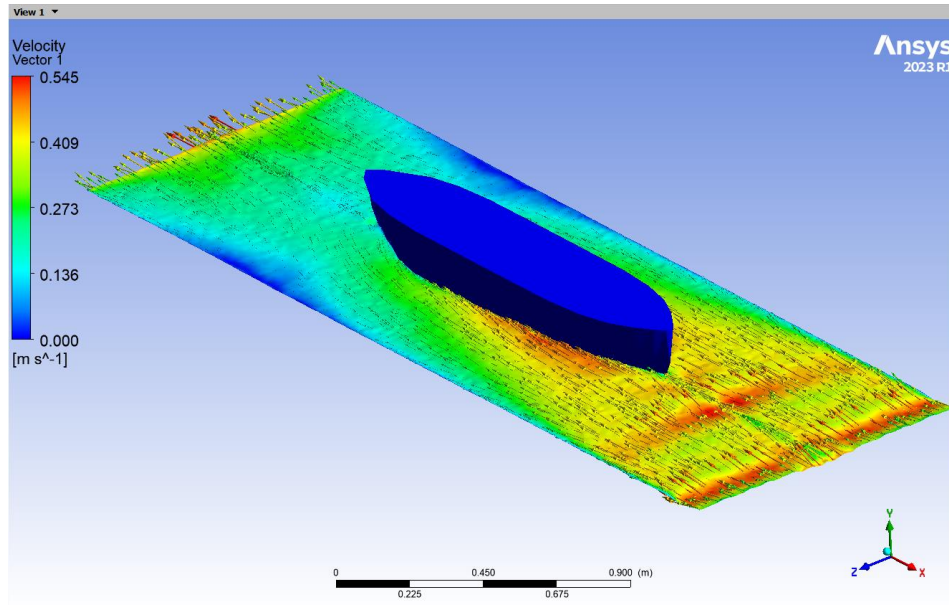
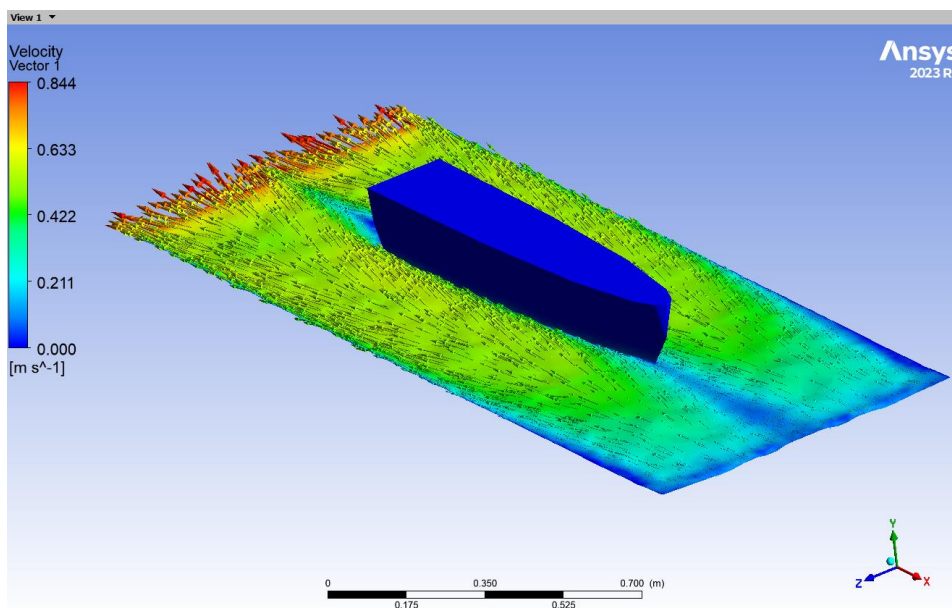


Figura 23

Resultado de la simulación hidrodinámica del flotador lateral



Con la simulación CFD realizada, se obtuvieron los resultados de las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre los cascos, con especial atención en las componentes de empuje vertical (eje Y) y empuje horizontal (eje X).

El empuje vertical, orientado en el sentido positivo del eje Y, permite determinar la capacidad total de sustentación del casco, es decir, el peso máximo que la embarcación

puede soportar, incluyendo su propio peso estructural y la carga útil, en correspondencia con el calado de diseño establecido.

Por otro lado, la fuerza de empuje horizontal, dirigida en el eje X negativo, representa la resistencia hidrodinámica al avance, cuyo valor permite estimar la fuerza de propulsión necesaria para mantener la embarcación en movimiento bajo las condiciones de flujo definidas en la simulación.

En la Figura 24 y la Figura 25 se presentan los resultados del empuje vertical (eje Y) obtenidos para el casco principal y el flotador lateral, respectivamente. De igual manera, la Figura 26 y la Figura 27 muestran los resultados correspondientes al empuje horizontal (eje X) para ambos modelos.

Figura 24

Resultado de la fuerza de empuje vertical (eje Y) del casco principal

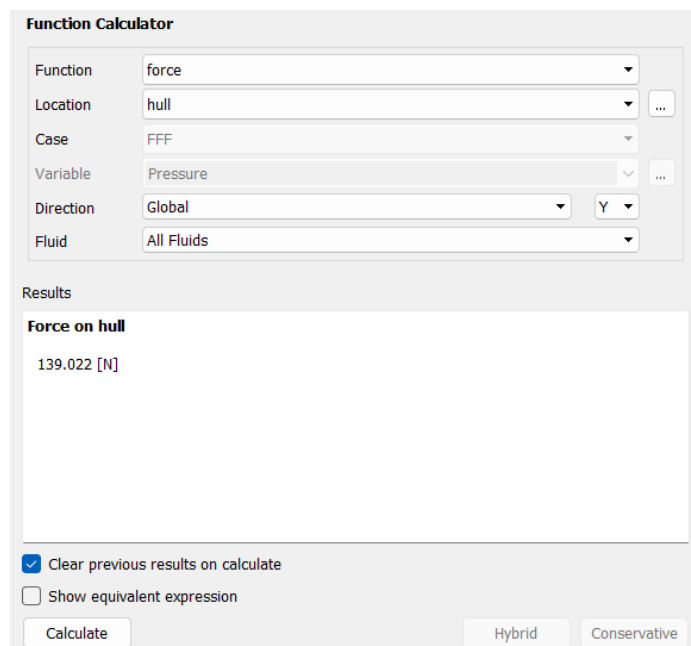


Figura 25

Resultado de la fuerza de empuje vertical (eje Y) del flotador lateral

The screenshot shows the 'Function Calculator' window. The 'Function' is set to 'force', 'Location' to 'hull', 'Case' to 'FFF', 'Variable' to 'Pressure', 'Direction' to 'Global' (with a sub-selector 'Y'), and 'Fluid' to 'All Fluids'. The 'Results' section displays 'Force on hull' with a value of '32.9218 [N]'. At the bottom, there are checkboxes for 'Clear previous results on calculate' (checked) and 'Show equivalent expression' (unchecked), along with 'Calculate', 'Hybrid', and 'Conservative' buttons.

Parameter	Value
Function	force
Location	hull
Case	FFF
Variable	Pressure
Direction	Global (Y)
Fluid	All Fluids

Results

Force on hull

32.9218 [N]

Figura 26

Resultado de la fuerza de empuje horizontal (eje X) del casco principal

The screenshot shows the 'Function Calculator' window. The 'Function' is set to 'force', 'Location' to 'hull', 'Case' to 'FFF', 'Variable' to 'Pressure', 'Direction' to 'Global' (with a sub-selector 'X'), and 'Fluid' to 'All Fluids'. The 'Results' section displays 'Force on hull' with a value of '-10.0918491 [N]'. At the bottom, there are checkboxes for 'Clear previous results on calculate' (checked) and 'Show equivalent expression' (unchecked), along with 'Calculate', 'Hybrid', and 'Conservative' buttons.

Parameter	Value
Function	force
Location	hull
Case	FFF
Variable	Pressure
Direction	Global (X)
Fluid	All Fluids

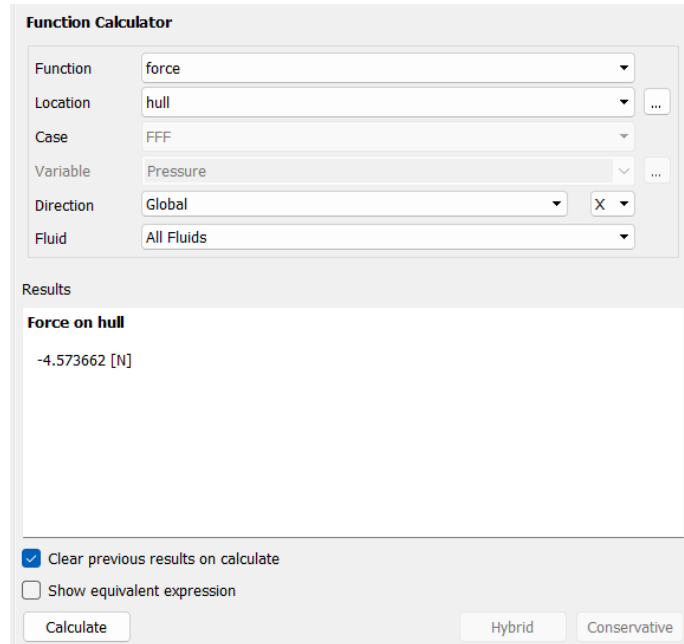
Results

Force on hull

-10.0918491 [N]

Figura 27

Resultado de la fuerza de empuje horizontal (eje X) del flotador lateral



A partir de los valores de fuerza obtenidos en la simulación CFD, se determina el peso total que cada casco puede soportar aplicando la segunda ley de Newton, considerando la relación entre la fuerza neta vertical (F_y) y la aceleración gravitatoria (g). Sin embargo, es importante precisar que el método de simulación utilizado modeló únicamente la mitad del casco mediante la aplicación del plano de simetría longitudinal. Por tal motivo, los resultados de fuerza proporcionados por ANSYS representan solo la mitad de la embarcación, y deben ser multiplicados por un factor de dos para obtener el valor total de empuje real antes de efectuar el cálculo de peso.

Para el casco principal:

$$F = m \times a$$

$$278.044 \text{ N} = m \times 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$28.34 \text{ kg} \cong m$$

Para el flotador lateral:

$$F = m \times a$$

$$65.8436 = m \times 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$6.71 \text{ kg} \cong m$$

De acuerdo con estos resultados, el casco principal soporta un empuje equivalente a 28.34 kg, mientras que cada flotador lateral aporta aproximadamente 6.71 kg de sustentación. En conjunto, el trimarán presenta una capacidad total de flotabilidad de 41.76 kg.

De manera análoga, a partir de los resultados obtenidos en la simulación CFD se determinan las fuerzas hidrodinámicas horizontales que actúan sobre el casco principal y los flotadores laterales. Dado que en este caso la simulación busca estimar la fuerza neta de oposición al movimiento, los valores obtenidos en Newton (N) se emplean directamente para cuantificar la energía necesaria para propulsar la embarcación bajo las condiciones definidas.

Los resultados arrojaron una fuerza de arrastre de -10.09 N para el casco principal y -4.57 N para el flotador lateral. Dado que el modelo empleado en la simulación corresponde a la mitad de cada casco, los valores obtenidos deben ser multiplicados por dos para representar el comportamiento real de la embarcación completa.

Por tanto, la fuerza total de resistencia al avance equivale aproximadamente a 20.18 N para el casco principal y 9.14 N para cada flotador lateral, obteniéndose una resistencia hidrodinámica combinada de 38.46 N para el conjunto trimarán. Este valor representa la fuerza de empuje mínima que el sistema de propulsión debe generar para mantener el movimiento del USV a una velocidad de 0.5 m/s bajo las condiciones establecidas.

3.1.1.5 Diseño mecánico-estructural de los cascos

Con la geometría del casco principal definida en Maxsurf y considerando los casos de carga verificados mediante ANSYS, el modelo se trasladó a Fusion 360 para ejecutar el vaciado de la envolvente según el espesor total especificado. A continuación, el sólido vaciado se exportó a Autodesk Inventor para desarrollar la disposición estructural del casco principal y de los flotadores.

En el casco principal, se incorporaron once cuadernas, mayormente equidistantes salvo la ubicada a popa por las dimensiones previstas de los compartimientos, y se definieron los mamparos y cajas estancas. La unión casco–estructura se realiza por co-curado, que consiste en posicionar cuadernas y mamparos sobre la piel interior mientras el laminado está fresco, conformar un filete estructural y aplicar bandas de solape en húmedo para asegurar continuidad y transferencia eficiente de esfuerzos. Asimismo, se modelaron las aberturas de los compartimientos, los alojamientos para los perfiles de madera balsa destinados a la conexión con los flotadores laterales y los pasos técnicos para el tendido

de cables entre compartimientos; todas las aristas de núcleo expuesto se sellarán con epoxi. En la Figura 28 se presenta el casco principal seccionado longitudinalmente (corte en eslora) y en la Figura 29 se muestra el casco principal completo.

Figura 28

Diseño estructural del casco principal en vista seccionada longitudinalmente

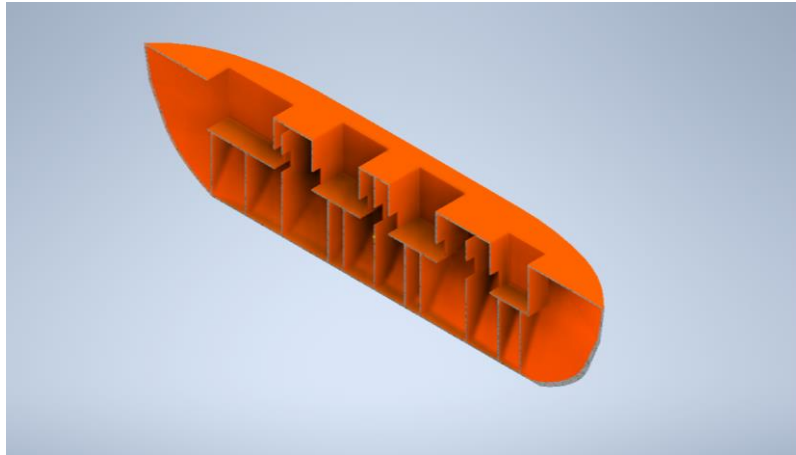
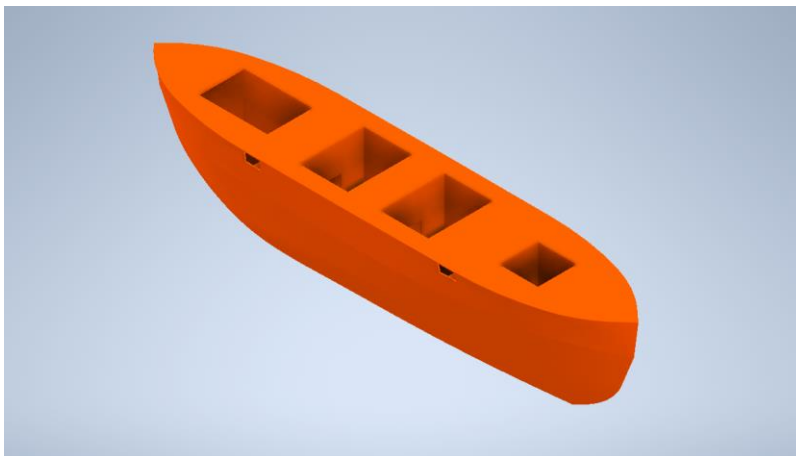


Figura 29

Diseño estructural del casco principal



En los flotadores se definió una disposición estructural con cuadernas transversales de paso regular y simetría entre ambos, incorporando refuerzos locales en proa y en la zona de interfase con las vigas compuestas de balsa–fibra–epoxi que los conectan con el casco principal. Se modelaron las aberturas para el alojamiento de dichas vigas, así como un compartimiento adicional; en todos los bordes de núcleo expuesto se prevé el sellado con epoxi. Para la unión mecánica de las vigas con los flotadores se adoptó la buena práctica de emplear espárragos A4-316. En la Figura 30 se muestra el flotador de babor en sección longitudinal y, en la Figura 31, su vista completa (ambas imágenes isométricas).

Figura 30

Diseño estructural del flotador de babor, sección longitudinal (imagen isométrica; orientación referida al buque)

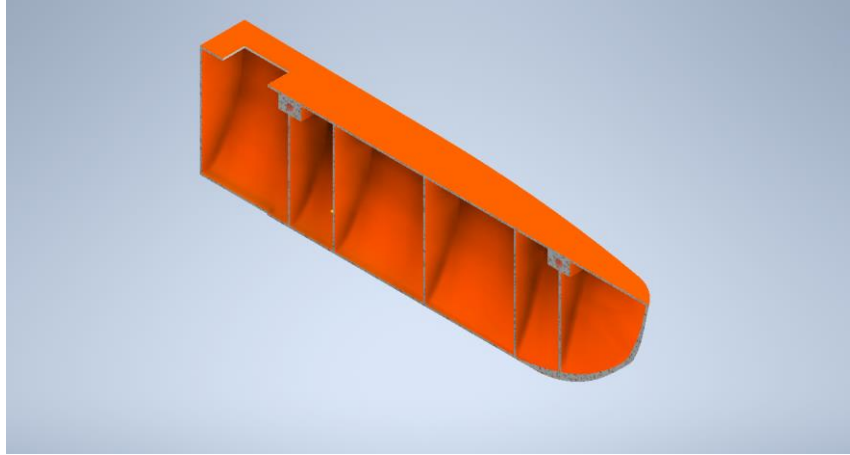
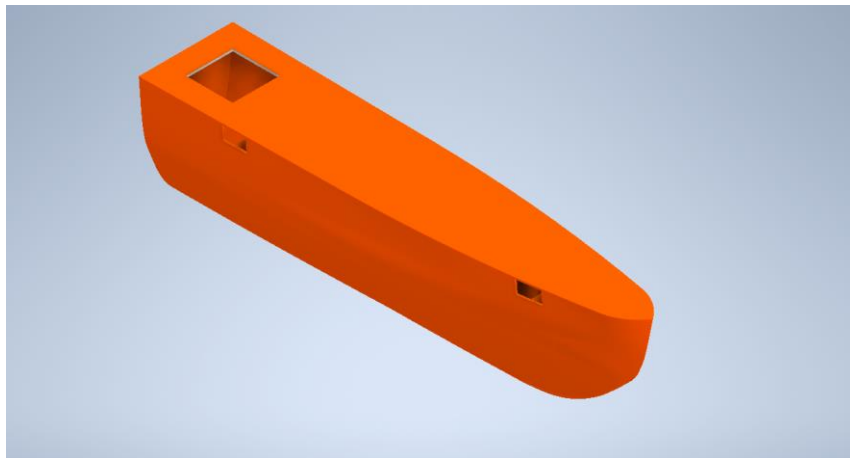


Figura 31

Diseño estructural del flotador de babor completo, exterior (imagen isométrica; orientación referida al buque)



En concordancia con la ISO (2022) para categoría D, el diseño mecánico-estructural incorpora bloques de espuma de poliuretano de celdas cerradas como reserva de flotación tanto en el casco principal como en los flotadores. La espuma se ubica en cavidades definidas por mamparos y cuadernas, priorizando simetría transversal y una posición baja y centrada para no penalizar el centro de gravedad. Todas las superficies de núcleo expuesto en dichas cavidades se sellan con epoxi para mitigar ingreso de humedad. Esta disposición contribuye a mantener el francobordo operativo, la flotación positiva en condición inundada y la estabilidad exigida para operación en aguas protegidas. En la

Figura 32 se presentan los bloques de espuma dispuestos en el casco principal. Asimismo, en la Figura 33, se presentan los bloques de espuma en los flotadores aplicando un criterio análogo de ubicación y sellado.

Figura 32

Disposición de bloques de espuma de celdas cerradas en el casco principal

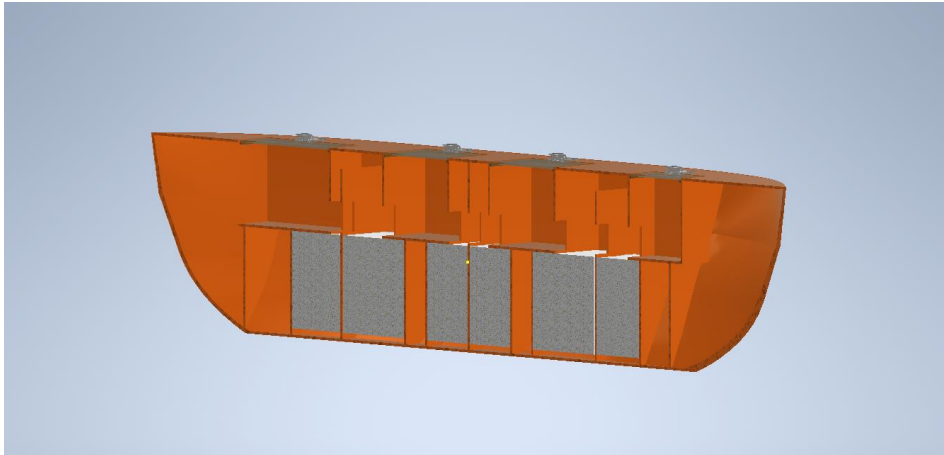
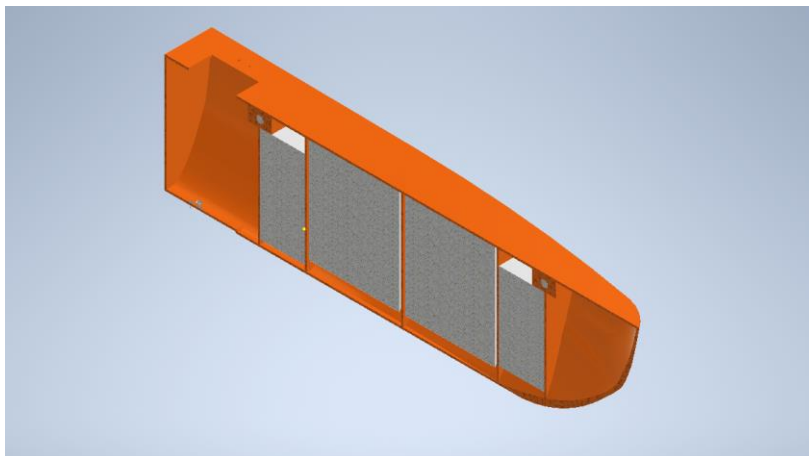


Figura 33

Disposición de bloques de espuma de celdas cerradas en el flotador lateral

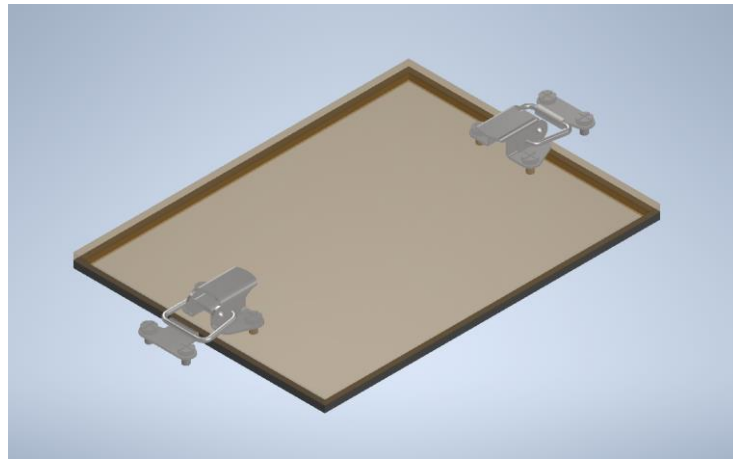


De acuerdo con ISO (2020b), para los requisitos de estanqueidad grado 4 para aberturas ubicadas en áreas IIa, III o IV (exposición baja a agua), se adopta un cierre no sumergible capaz de resistir lluvia y salpicaduras ligeras. En consecuencia, la solución seleccionada consiste en tapas de policarbonato (PC) con cierre positivo mediante pestillos de palanca (*toggle latches*) y junta de goma perimetral, garantizando el asiento uniforme sobre el marco.

La tapa está compuesta por una placa superior de PC de 4 mm y un marco inferior de 4 mm que actúa como guía de la junta, conformando un canal continuo para el sello y limitando la compresión. El diseño prioriza la distribución simétrica de los puntos de cierre para mantener la presión de contacto del empaque y evitar puntos de fuga. En la Figura 34 se muestra la tapa con su marco, la junta y los pestillos de palanca en su configuración de montaje.

Figura 34

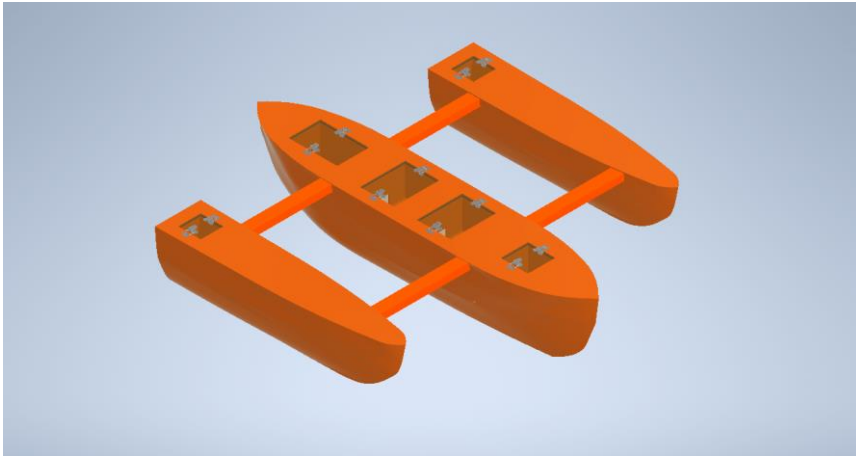
Ensamble estructural de tapa de compartimiento



Una vez establecidas las especificaciones y geometría, se integra el conjunto estructural del USV. La conexión estructural entre casco principal y flotadores se resuelve con dos vigas compuestas de balsa, fibra y epoxi de 50 x 30 mm, ancladas a los flotadores con espárragos A4-316. El casco principal concentra la electrónica y conforma cuatro compartimientos con cierre y sellado; en total se disponen seis tapas de acceso, cuatro en el casco principal para intervención y mantenimiento y dos en los flotadores destinadas exclusivamente al acceso para montaje y servicio del propulsor, sin configurar compartimientos independientes. La Figura 35 presenta el ensamble estructural principal del USV.

Figura 35

Ensamble estructural principal del USV

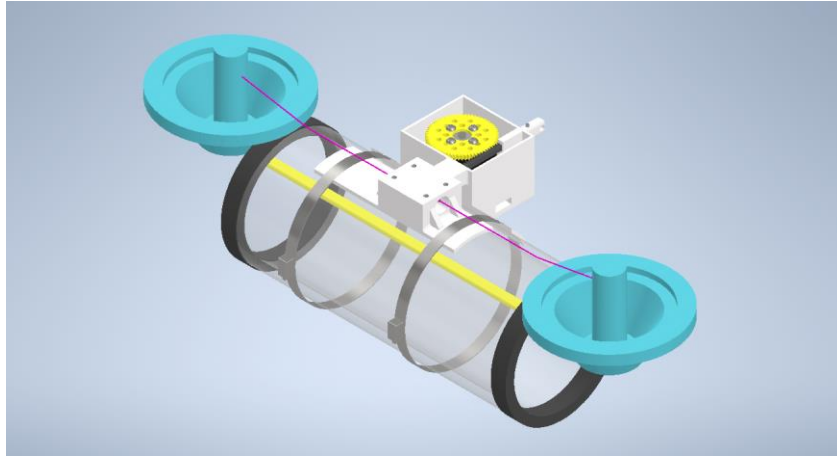


3.1.2 Diseño del sistema de muestreo

Se requiere tomar muestras a aproximadamente 0.20 m bajo la superficie de acuerdo con ANA (2016). Asimismo, se requiere un sistema de operación sencilla, de baja demanda de fuerza, compatible con exposición al agua, sin interferencia con los cascos y capaz de descender dos botellas de 2.0 L. Para atender estos requisitos se seleccionó un conjunto comercial de cremallera y piñón en acetal de la línea goBILDA, conformado por una cremallera en acetal (SKU 2311-0001-0118), recortada a la longitud requerida para el recorrido, y un engranaje de 64 dientes (SKU 2312-0414-0064), de 4 mm de espesor, montado directamente sobre el eje del servomotor DS35MG de la marca 9imod. Este conjunto proporciona el desplazamiento lineal necesario con baja fricción y buena resistencia al desgaste, sin necesidad de diseñar ni dimensionar el dentado. Adicionalmente, se diseñó una estructura de acople para integrar el mecanismo de cremallera y piñón al sistema de muestreo. Al igual que en las botellas Van Dorn convencionales, la botella se sujeta mediante abrazaderas de acero inoxidable, garantizando una fijación segura del conjunto durante las maniobras de toma de muestra. En la Figura 36 se muestra el sistema de muestreo con la botella de 2.0 L, el servomotor y el mecanismo de cremallera y piñón.

Figura 36

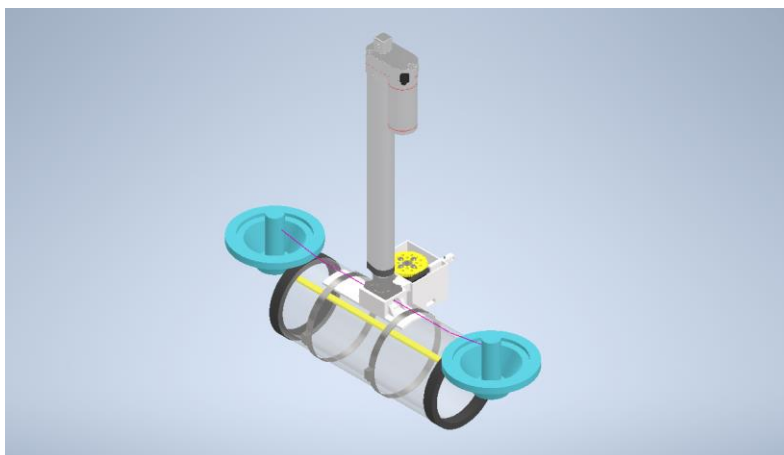
Sistema de muestreo: conjunto cremallera y piñón con servomotor y botella Van Dorn de 2,0 L



La solución de descenso se retoma del diseño precedente, en el que se empleó el mismo principio para descender los propulsores: un actuador lineal marca NINGBO modelo LA-10A de 250mm de carrera conectado al conjunto mediante un acople empernado a la caja. En el presente sistema, el acople de acero inoxidable A4-316 mantiene el concepto original por su rigidez, resistencia a la corrosión y facilidad de desmontaje, adaptándolo ahora a la maniobra de las botellas Van Dorn. En la Figura 37 se presenta el pistón acoplado al sistema.

Figura 37

Sistema de muestreo con actuador lineal, acople y montaje

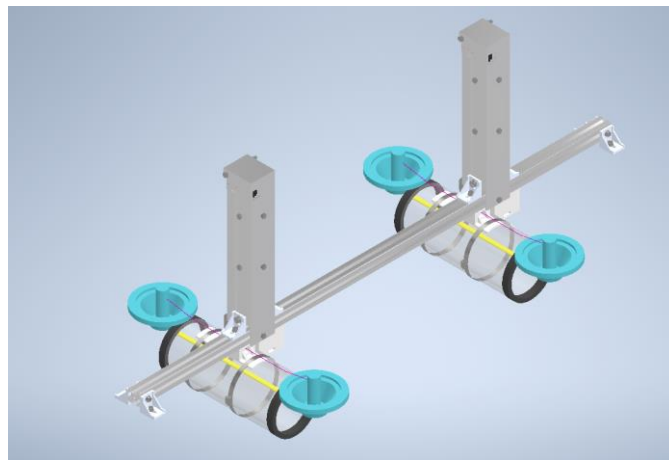


Tras definir el funcionamiento del sistema, se diseñó la estructura de soporte tomando como referencia el prototipo predecesor: se emplearon perfiles V-slot de 30x30 mm con sus escuadras y la tornillería compatible para todas las uniones. Dado que las botellas no

deben entrar en contacto con el agua antes del muestreo para evitar contaminación, se elevó la altura del conjunto mediante perfiles V slot adicionales, de modo que al inicio permanezca fuera del agua y solo descienda durante la toma. Se incorporó además una cubierta de aluminio para el actuador lineal, que protege el mecanismo frente a salpicaduras y asegura su alineamiento y posicionamiento. En la Figura 38 se observa la estructura del sistema de muestreo montada en el USV, mientras que sus planos constructivos se presentan en el Anexo 2.

Figura 38

Montaje del sistema de muestreo en perfiles V-slot



Según Atlas Steels (2021), el límite elástico típico de la aleación de aluminio 6063 T5, utilizada en los perfiles V-slot, es de 145 MPa. Con este valor de referencia se efectuó un análisis de esfuerzos en el que se activó la gravedad del conjunto y se aplicaron cargas verticales de 65 N en los montantes que soportan cada botella, escenario conservador respecto de los 55 N nominales que representa el peso del sistema de muestreo. Los resultados arrojaron una tensión máxima de Von Mises de 26 MPa y un factor de seguridad mínimo de 3.3, por lo que la estructura cumple con holgura para las condiciones de operación previstas. En la Figura 39 se presenta el mapa de tensiones y en la Figura 40 el mapa del factor de seguridad.

Figura 39

Distribución de tensiones de Von Mises en el conjunto de perfiles V-slot

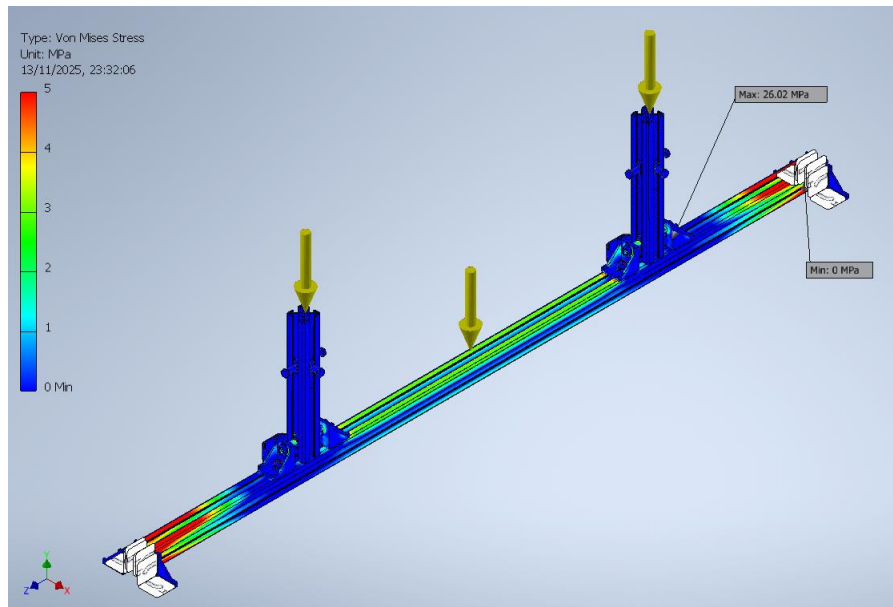
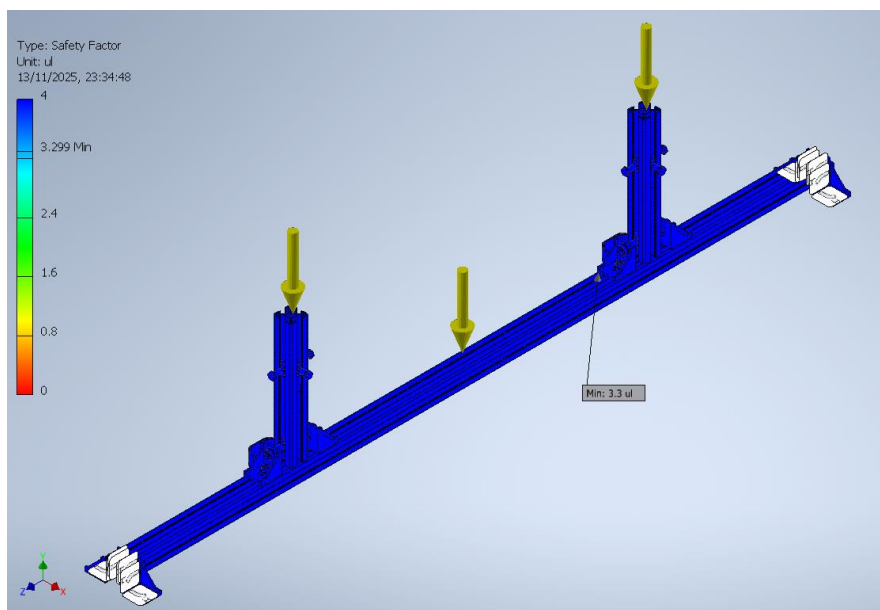


Figura 40

Distribución del factor de seguridad en el conjunto de perfiles V-slot



3.1.3 Diseño de estructuras de soporte de equipos electrónicos

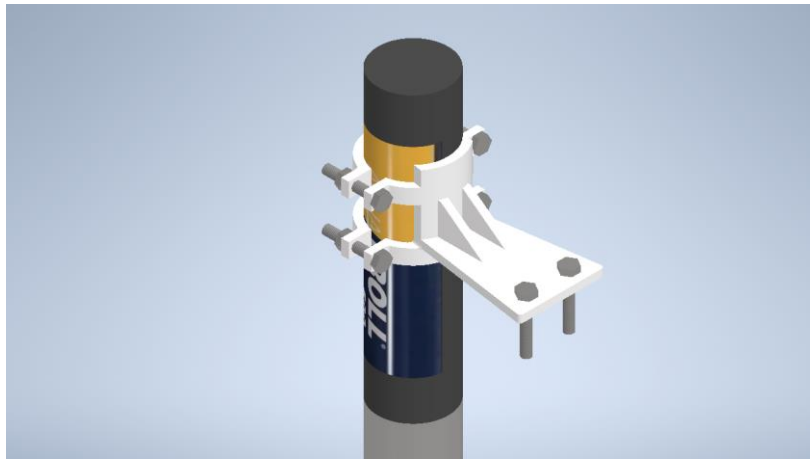
3.1.3.1 Soporte de sensor multiparamétrico

Se requiere integrar el sensor multiparamétrico Aqua Troll 500 para el monitoreo en tiempo real de parámetros del agua durante la navegación, sin perturbar las condiciones de muestreo ni la hidrodinámica del USV. Para ello se diseñó un soporte compacto de policarbonato de 5 mm de espesor, compuesto por dos abrazaderas que aseguran el cuerpo

del sensor y una placa base fijada en la popa del casco principal para minimizar el arrastre y la exposición a salpicaduras. La tornillería propuesta es A4-316 y las perforaciones de montaje en el casco se sellan con epoxi para proteger el núcleo del sándwich. La ubicación seleccionada evita interferencias con propulsión y maniobras, facilita el mantenimiento y mantiene despejado el campo de medición. En la Figura 41 se muestra el ensamble del sensor con su soporte.

Figura 41

Ensamble del sensor multiparamétrico con soporte de 5 mm



Para verificar el soporte del sensor se requiere un análisis de esfuerzos; no obstante, al no disponerse inicialmente de las fuerzas actuantes sobre el sensor en servicio, se ejecutó una simulación hidrodinámica (CFD) en ANSYS a una corriente incidente de 0.50 m/s para estimar las acciones horizontales de arrastre y la resultante vertical asociada a la flotación. Los campos de velocidad y presión del entorno del sensor se muestran en la Figura 42. A partir de ellos se integraron las presiones sobre la superficie mojada para obtener la fuerza de empuje horizontal (eje x), cuyo resultado se presenta en la Figura 43, y la fuerza vertical (eje y), presentada en la Figura 44. Estas cargas obtenidas por CFD se emplearon luego como condiciones de entrada para la verificación estructural del soporte.

Figura 42

Resultado de la simulación hidrodinámica del sensor multiparamétrico

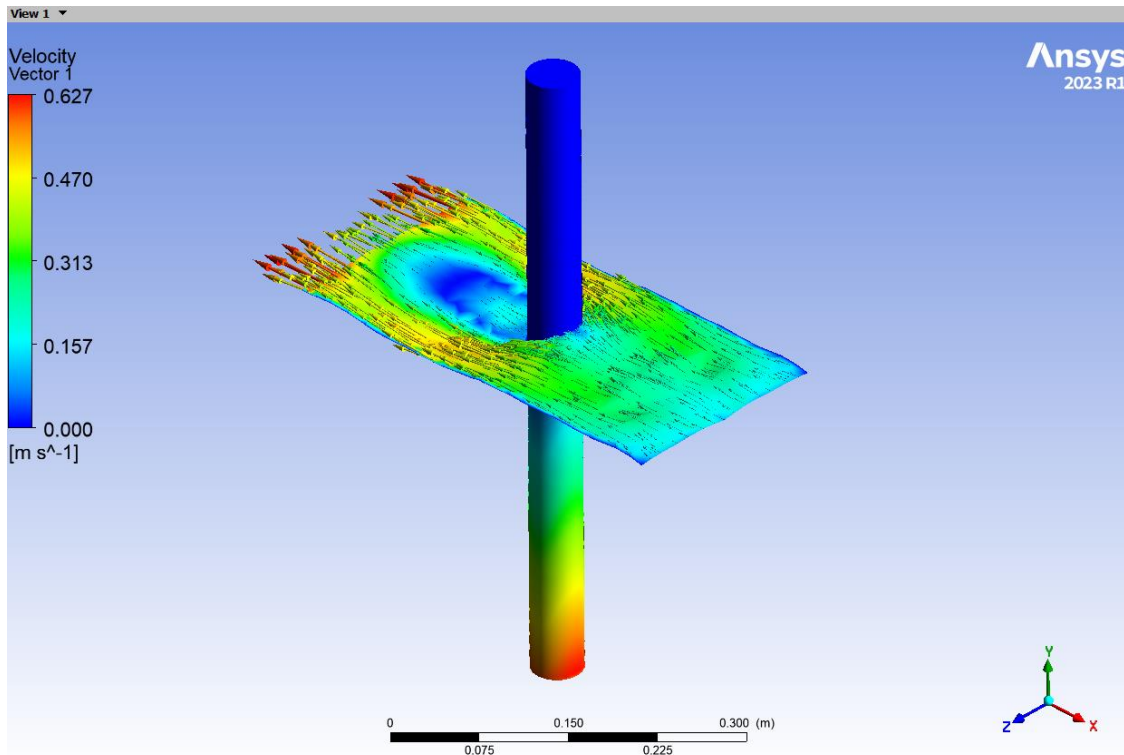


Figura 43

Resultado de la fuerza de empuje horizontal (eje X) del sensor multiparamétrico

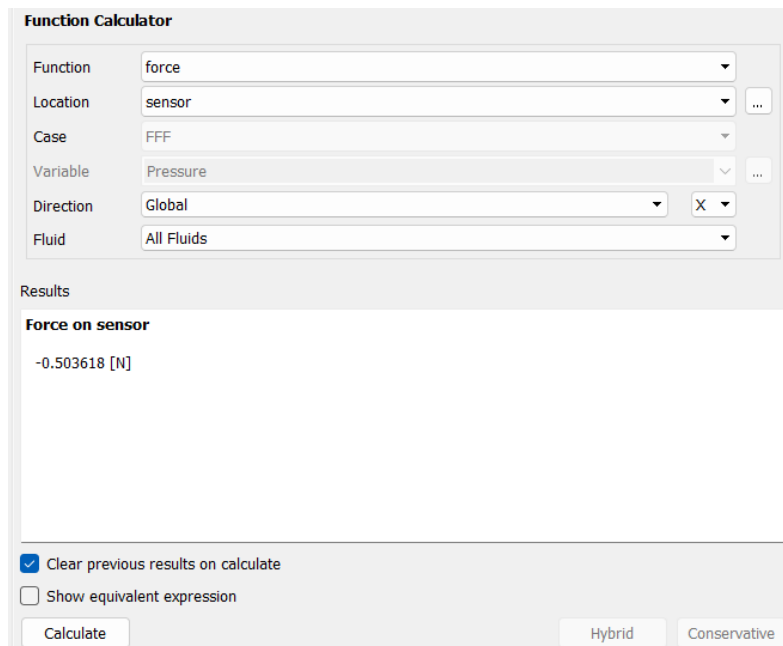
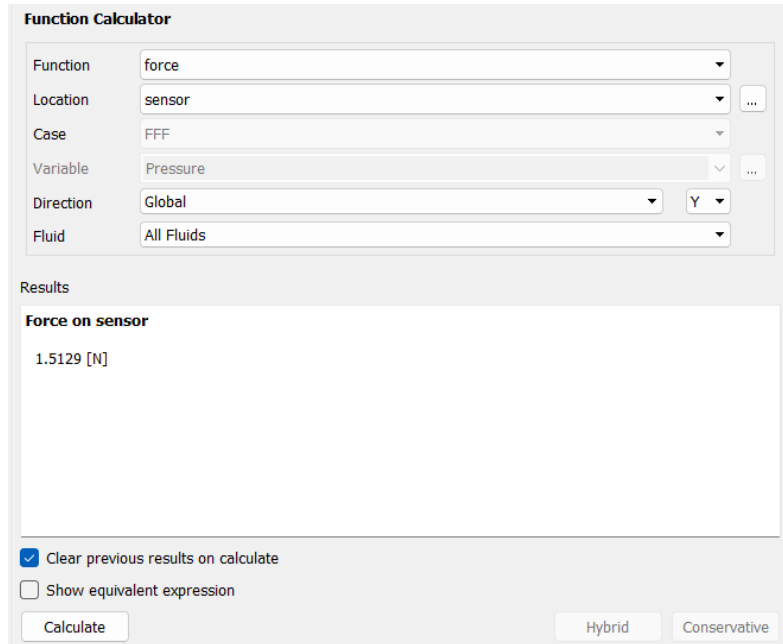


Figura 44

Resultado de la fuerza de empuje vertical (eje Y) del sensor multiparamétrico



The image shows a software interface titled "Function Calculator". It contains several dropdown menus and a "Calculate" button. The settings are as follows:

- Function: force
- Location: sensor
- Case: FFF
- Variable: Pressure
- Direction: Global (with a sub-selector set to Y)
- Fluid: All Fluids

Below the settings, the "Results" section displays:

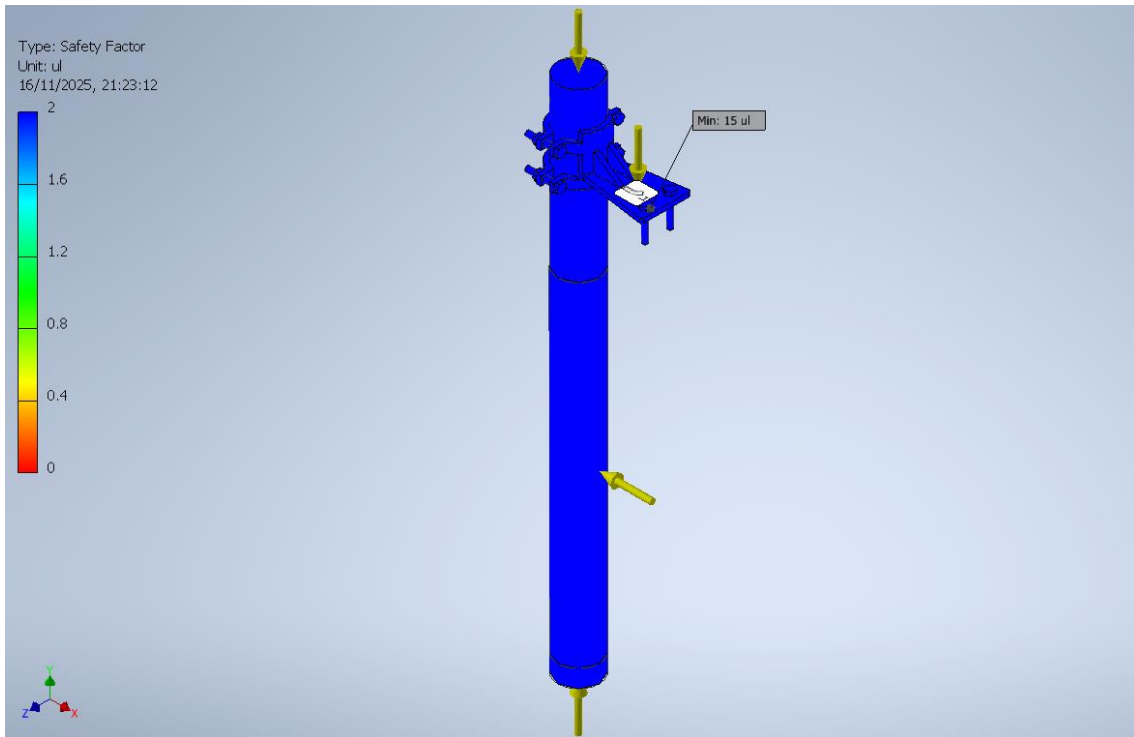
Force on sensor
1.5129 [N]

At the bottom, there are two checkboxes: "Clear previous results on calculate" (checked) and "Show equivalent expression" (unchecked). There is also a "Calculate" button and two radio buttons labeled "Hybrid" and "Conservative".

Con las fuerzas obtenidas en CFD, se aplicó un factor dos por la condición de simetría. Con ello se definieron las cargas para el análisis estructural del soporte: gravedad activada, peso del sensor de 1 kg, fuerza horizontal de 1.01 N en la dirección global X y fuerza vertical ascendente de 3.03 N en la dirección global Y. Bajo estas acciones, el cálculo entregó un factor de seguridad mínimo de 15, lo que confirma un margen holgado frente a la fluencia del material y la suficiencia del diseño. La Figura 45 presenta el mapa del factor de seguridad del conjunto.

Figura 45

Distribución del factor de seguridad en el ensamble del soporte y sensor multiparamétrico

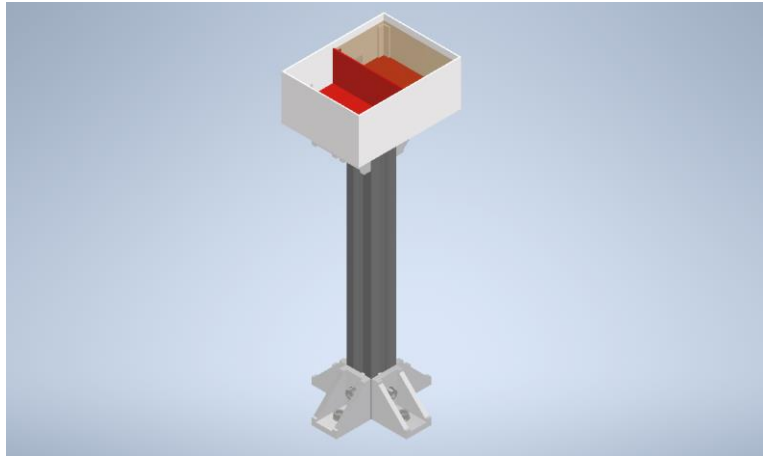


3.1.3.2 Soporte para GPS y módulo de comunicación

Para garantizar una recepción y enlace confiables, el GPS y el módulo de comunicación se montan sobre una columna de 20 cm construida con perfiles V slot de 20x20 mm, anclada con escuadras y tornillería compatible. En la parte superior se dispone una caja de ABS común para ambos dispositivos, dividida en dos zonas: una expuesta (sin tapa) para el GPS, a fin de mantener la antena a cielo abierto, y otra cerrada con tapa de policarbonato que incorpora un orificio para la antena del módulo de comunicación. Las perforaciones de fijación se sellan con epoxi para conservar la estanqueidad de la estructura (grado 4 frente a salpicaduras), minimizando sombras de señal, protegiendo la electrónica y facilitando el mantenimiento. En la Figura 46 se muestra el soporte elevado con la caja de ABS para los dispositivos de posición satelital y comunicación.

Figura 46

Ensamble de estructura de soporte para GPS y módulo de comunicación

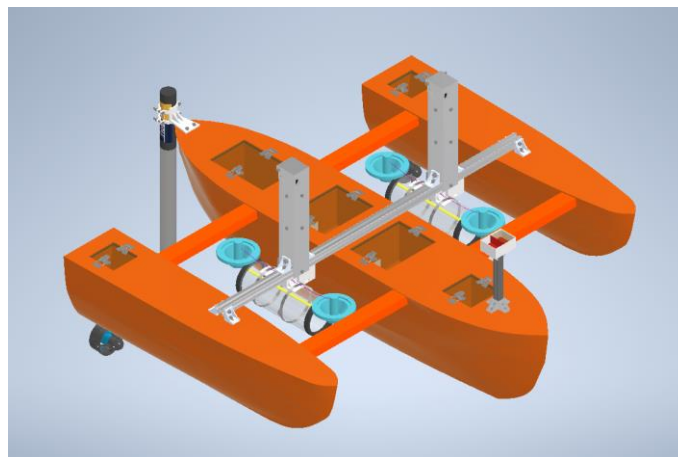


3.1.4 Ensamblaje del USV y evaluación de estabilidad transversal

En continuidad con lo desarrollado en secciones previas, la Figura 47 muestra el ensamblaje general del USV y la disposición del sistema de muestreo y de los principales periféricos. El sistema de muestreo se ubica próximo al centro geométrico del trimarán para mantener su masa cerca del centro de flotación y reducir los momentos de escora. El sensor multiparamétrico se instala en popa sobre un soporte dedicado, mientras que la estructura que integra el GPS y el módulo de comunicación se dispone en proa, contribuyendo al equilibrio longitudinal. Finalmente, los propulsores eléctricos se montan en popa, atornillados a los flotadores laterales. Los planos constructivos del ensamblaje y de estos sistemas se presentan en el Anexo 1.

Figura 47

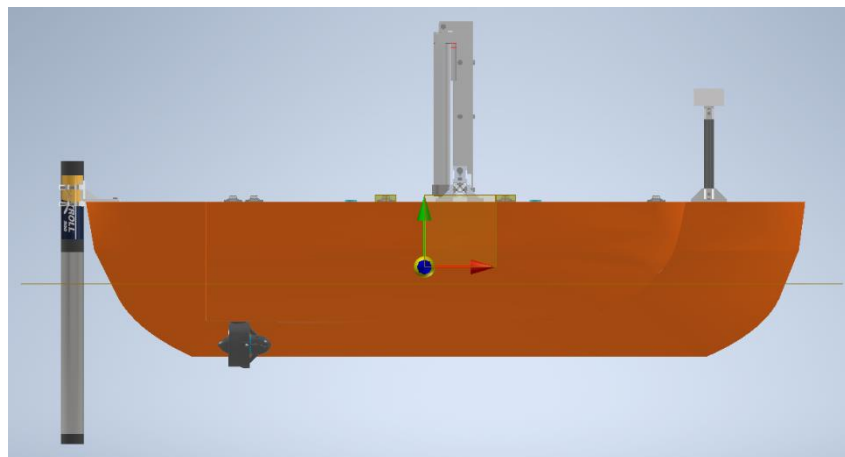
Ensamblaje general del USV



Posteriormente, se procedió a ubicar los equipos electrónicos dentro de los compartimientos internos del casco. La principal fuente de peso, correspondiente al banco de baterías, se instaló en el compartimiento de popa, mientras que los dispositivos electrónicos restantes se distribuyeron en la zona de proa con el fin de generar un contrapeso y favorecer el equilibrio longitudinal. Adicionalmente, se incorporó una unidad de medición inercial (IMU) con receptor GPS integrado en el compartimiento más cercano al centro de la embarcación, siendo este el único instrumento alojado en dicho espacio, de manera que su masa coincida aproximadamente con el centro geométrico del casco. En la Figura 48 se muestra la posición del centro de gravedad resultante del USV, obtenida a partir del modelo tridimensional en Autodesk Inventor.

Figura 48

Centro de gravedad resultante del USV con componentes integrados



Desde el punto de vista hidrostático, la evaluación de la estabilidad transversal del USV se realiza mediante el cálculo de la altura metacéntrica transversal (GM_t), definida como la distancia entre el centro de gravedad (G) y el metacentro transversal (M). Para pequeños ángulos de escora, la altura metacéntrica transversal se expresa como:

$$GM_t = KB + BM_t - KG$$

En la ecuación anterior, KB es la altura del centro de carena respecto al plano base, BM_t es el radio metacéntrico transversal y KG es la altura del centro de gravedad. Un valor positivo de GM_t indica que la embarcación genera un momento restaurador frente a pequeñas escoras y, por tanto, presenta estabilidad inicial transversal.

Como paso previo a este cálculo, se adoptó un sistema cartesiano XYZ con origen en el modelo 3D del USV, considerando el eje Y como vertical positivo hacia arriba. A partir

del ensamblaje completo en Autodesk Inventor se obtuvieron las coordenadas del plano base del casco principal y del centro de gravedad global, respectivamente Y_K y Y_G . La altura del centro de gravedad respecto al plano base se define como KG y se calcula según las expresiones siguientes:

$$Y_K = -0.15 \text{ m}$$

$$Y_G = 0.035 \text{ m}$$

$$KG = Y_G - Y_K$$

$$KG = 0.035 + 0.15 = 0.185 \text{ m}$$

Los parámetros hidrostáticos necesarios para el cálculo de GM_t se obtuvieron a partir de los resultados del casco principal mostrados en la Figura 13, evaluados para la línea de flotación de diseño. En dicha condición se determinaron los valores de KB y BM_t , cuyas magnitudes son 0.122 m y 0.093 m, respectivamente.

Al reemplazar en la expresión de GM_t los valores determinados, se obtiene:

$$GM_t = KB + BM_t - KG$$

$$GM_t = 0.122 + 0.093 - 0.185$$

$$GM_t = 0.030 \text{ m}$$

El valor obtenido de la altura metacéntrica transversal fue positivo, lo que indica que el USV genera un momento restaurador frente a pequeñas escoras y, por tanto, presenta una estabilidad transversal adecuada en la condición de diseño considerada. Cabe señalar que en este cálculo solo se emplearon los parámetros KB y BM_t del casco principal, sin incorporar explícitamente los valores de los flotadores laterales; ello se debe a que el análisis hidrostático disponible en Maxsurf se realizó sobre cada casco por separado. No obstante, la presencia de los flotadores incrementa el momento de inercia de la superficie de flotación del conjunto trimarán, por lo que el valor de GM_t obtenido para el casco principal puede considerarse conservador, proporcionando un margen de estabilidad adicional en la configuración real del USV.

3.1.5 Diseño eléctrico

3.1.5.1 Definición de requerimientos

El diseño eléctrico del USV corresponde a brindar una autonomía de 120 minutos con el fin de realizar monitoreo y toma de muestras de cuerpos de agua lénticos. Además, según Cavero et al. (2020) la temperatura más baja medida durante el periodo de monitoreo en la laguna Huampo fue de 11.3°C, este dato servirá como referencia de selección de sensores y actuadores para que puedan operar en las condiciones de los cuerpos de agua.

Teniendo en cuenta el requisito de tiempo y el espacio disponible de 160mm x 210mm x 130mm se debe realizar una selección de componentes para poder determinar la capacidad de la batería y la configuración de las celdas.

3.1.5.2 Selección de sonda multiparamétrica

En concordancia con el Decreto Supremo 004-2017-MINAM (2017) se toma como referencia los ECA para la selección de la sonda multiparamétrica en la categoría de Lagos y Lagunas. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los valores permisibles para los parámetros de campo.

Tabla 3

Parámetros según Estándares de Calidad Ambiental para lagunas y lagos

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos
Conductividad	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1 000
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.5 a 9.0

Nota. Categoría 4: Conservación del ambiente acuático. Adaptado de “Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias”, por MINAM, 2017.

Con los valores mencionados en la Tabla 3 sirven para tomar como referencia la selección de la sonda multiparamétrica. Para la conductividad eléctrica el valor determinado como máximo es 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ya que valores superiores a este son característicos de aguas salinas. En el caso del oxígeno disuelto el valor mínimo de 5 mg/L sirve para garantizar buenas condiciones para la vida acuática. El pH aceptable debe estar entre 6.5 y 9.0, ya que valores fuera de ese rango indican que el agua está demasiado ácida o básica para la fauna acuática. Con estos valores se listan las siguientes sondas multiparamétricas en la Tabla 4.

Tabla 4*Selección de sonda multiparamétrica*

Modelo		Aqua TROLL 500	HI9829	EXO3^S	
Marca		In-Situ	HANNA instruments	YSI XYLEM	
Peso (kg)		0.98	-	1.06	
Tamaño (mm)		590 x 47	-	428 X 76	
Long. x Diámetro					
Voltaje (V)		12	12	12	
Corriente (mA)		75	-	-	
Comunicación		RS-485/MODBUS, SDI-12, Bluetooth	USB	RS-232, SDI-12, Modbus, RS-485	
Temperatura de Operación (°C)		-5 a 50	-5 a 55	-5 a 50	
Profundidad máxima (m)		200	20	250	
Protección		IP68	IP68	IP68	
Parámetros	Oxígeno Disuelto	Exactitud	±0.1 mg/L	±0.1 mg/L	±0.1 mg/L
		Rango	0 a 60 mg/L	0 a 50 mg/L	0 a 50 mg/L
		Resolución	0.01 mg/L	0.01 mg/L	0.01 mg/L
	pH	Exactitud	±0.1	±0.02	±0.2
		Rango	0 a 14 pH	0 a 14 pH	0 a 14 pH
		Resolución	0.01 pH	0.01 pH	0.01 pH
	Temperatura	Exactitud	± 0.1° C	± 0.15° C	± 0.2° C
		Rango	-5 a 50° C	-5 a 55° C	-5 a 50° C
		Resolución	0.001° C	0.01° C	0.001° C
	Conductividad	Exactitud	±0.5%	±1.0%	±1.0%
		Rango	0 a 350000µS/cm	0 a 200000µS/cm	0 a 200000µS/cm
		Resolución	0.1 µS/cm	0.1 µS/cm	0.1 µS/cm
	Turbidez	Exactitud	±0.5 NTU	±0.3 NTU	±0.3 NTU
		Rango	0 - 4,000 NTU	0 - 1,000 NTU	0 - 4,000 NTU
Resolución		0.01 NTU	0.1 NTU	0.1 NTU	

Nota. Elaborado a partir de In-Situ (s.f.), Hanna Instruments (s.f.) y YSI XYLEM (s.f.).

Para la medición de los parámetros de campo se evaluaron las sondas multiparamétricas Aqua TROLL 500 (In-Situ), HI9829 (HANNA Instruments) y EXO3 (YSI Xylem). Todas cubren los rangos establecidos por los ECA para lagos y lagunas y permiten medir los parámetros de campo tales como pH, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura y turbidez. Sin embargo, la sonda Aqua TROLL 500 ofrece rangos de trabajo holgadamente superiores a los requeridos por la norma: el sensor de conductividad cubre de 0 a 350 000 µS/cm, el sensor de oxígeno disuelto mide de 0 a 60 mg/L, mientras que el sensor de pH trabaja de 0 a 14 unidades, lo que permite detectar con suficiente margen cualquier desviación respecto de los umbrales del ECA (conductividad $\leq 1\ 000\ \mu\text{S}/\text{cm}$, OD $\geq 5\ \text{mg}/\text{L}$ y pH 6,5–9).

Adicionalmente, la sonda multiparamétrica Aqua TROLL 500 está diseñada específicamente para monitoreo autónomo de largo plazo en ambientes superficiales y subterráneos, grado de protección IP68 y rango de temperatura de -5 a 50 °C, lo que resulta adecuado para las condiciones de los cuerpos lénticos a monitorear. Desde el punto de vista de integración con el USV, la sonda admite alimentación externa de 12 V siendo compatible con el sistema sin necesidad de utilizar un conversor de voltaje. Además, dispone de interfaz de comunicación serial RS485 permitiendo su conexión con la Raspberry Pi mediante un acoplador RS485 – USB, lo cual facilita su conexión a la electrónica embarcada y el envío remoto de datos.

Considerando en conjunto la cobertura de parámetros, la robustez mecánica para despliegues prolongados y la facilidad de integración eléctrica y de comunicaciones con el USV, se selecciona la sonda Aqua TROLL 500 como opción más adecuada.

3.1.5.3 Selección de GPS con IMU

Se seleccionó el módulo JY-GPSIMU WTGAHRS1 de Wit Motion, el cual es un módulo de 10 ejes que, además de la IMU triaxial, integra magnetómetro, barómetro y un receptor GPS, e incorpora un algoritmo de fusión con filtro de Kalman de alta precisión. El módulo opera con una tensión de 3.3 a 5 V, con un consumo típico de alrededor de 20 mA (<40 mA máximo), y ofrece una frecuencia de salida ajustable hasta 200 Hz mediante interfaz UART-TTL, compatible con la Raspberry Pi 4B.

La integración en un solo equipo de la IMU, la brújula, el barómetro y el GPS simplifica significativamente el diseño del sistema de navegación del USV, al proporcionar en un único flujo de datos la actitud, el rumbo y la posición, evitando el uso de módulos adicionales y reduciendo el esfuerzo de desarrollo de software. Considerando la precisión de la orientación, la presencia de GPS integrado, la robustez mecánica del módulo y la facilidad de comunicaciones con la Raspberry Pi 4B, se selecciona la IMU WTGAHRS1 de Wit Motion como solución más adecuada para el sistema de navegación del USV.

3.1.5.4 Selección de propulsores

Para la selección de los propulsores (thrusters) se considera el empuje mínimo determinado en el análisis mecánico, equivalente a 2 kgf. Asimismo, se establece que el thruster opere a una tensión de 12 V y que presente el menor consumo posible de corriente de alimentación, a fin de optimizar el uso eficiente de la batería. Finalmente, se prioriza la facilidad de integración mediante señal PWM a través de su controlador electrónico

(ESC). En la Tabla 5 se resumen los parámetros y valores adoptados para la selección del sistema de propulsión.

Tabla 5

Selección de thrusters

Marca	Modelo	Empuje Avance (kgf)	Empuje Reversa (kgf)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Peso (kg)	ESC
BlueRobotics	T200	3.7	2.9	12	16.9	0.43	30A
APISQUEEN	U8 290KV	3.6	3.0	12	11.7	0.45	45A
Hobby Water	TD7	1.6	1.9	12	3.8	0.49	30A

Nota. Elaborado a partir de Blue Robotics (s.f.), APISQUEEN (s.f.) y Hobby Water (s.f.).

De la Tabla 5 se muestra que tanto el BlueRobotics T200 como el APISQUEEN U8 cumplen con el requisito de empuje mínimo de 2 kgf y con la tensión de operación de 12 V. Sin embargo, se seleccionó el modelo APISQUEEN U8 porque ofrece un empuje de avance de 3.6 kgf y en reversa de 3.0 kgf, valores que superan con holgura el requisito de diseño, con un consumo de corriente menor 11.7 A frente a 16.9 A del T200, lo que favorece la autonomía del sistema de baterías. Adicionalmente, presenta una integración compatible mediante señal PWM a través de su ESC.

3.1.5.5 Selección de actuador lineal eléctrico

Según el Protocolo de monitoreo, para el caso de obtener una muestra utilizando embarcación, el recipiente muestreador debe alcanzar una profundidad aproximada de 200 mm desde la superficie (ANA, 2016). En la parte mecánica se diseñó el sistema de muestreo con una botella hidrográfica Van Dorn, cuya capacidad es 2L. Por lo tanto, se debe considerar el escenario del peso del propio sistema más el de la muestra, cuyo valor alcanzaría 3.6 kg equivalente a 35.3 N. Entonces se considera como criterio de selección un actuador lineal con 250mm de recorrido como mínimo y 40N de fuerza. En la tabla 6, se listan los actuadores lineales eléctricos que cumplen con los requisitos establecidos

Tabla 3

Selección de actuador lineal eléctrico

Marca	Modelo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Peso (kg)	Fuerza (N)	Stroke (mm)	Velocidad (mm/s)	Protección
NINGBO	LA-10A	12	3	0.43	900	250	5	IP65
FUZHOU	BK-TG	12	5.4	0.45	900	250	4	IP65

DREAMTECH FTG50 12 2.2 0.57 1200 300 5 IP65

Nota. Elaborado a partir de NINGBO (s.f.), FUZHOU (s.f.) y DREAMTECH (s.f.).

Según la Tabla 4 el actuador lineal eléctrico NINGBO LA-10A cumple con el requisito de recorrido establecido para descender la botella hidrográfica y capturar la muestra. A la vez, es el que menor peso tiene y opera a 12 V.

3.1.5.6 Selección de servomotor

Para la selección del servomotor se define como principal requisito que posea grado de protección IP67 como mínimo para que pueda ser sumergido durante aproximadamente 3 minutos que es el tiempo que dura en descender, obtener la muestra y ascender hasta alcanzar la posición inicial. Además, se debe considerar un torque mínimo de 20 kg/cm, ya que el sistema planteado en la parte mecánica utiliza un servomotor de capacidades similares. En la Tabla 7, se listan las características principales para poder seleccionar al que mejor cumpla con los requerimientos.

Tabla 4

Selección de servomotor

Marca	Modelo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Peso (kg)	Torque (kg/cm)	Protección	Precio (USD)
DSSERVO	DS3240	5	1.9	0.06	29	Waterproof	20.6
DSSERVO	DS3225	5	1.5	0.06	21	Waterproof	11.8
DSSERVO	RDS5160	5	2.5	0.16	58	Waterproof	25.3
9imod	DS35MG	5	1.9	0.08	25	IP67	20.7

Nota. Elaborado a partir de Wishiot (s.f.) y 9imod (s.f.).

De la Tabla 7 se seleccionó el Servomotor DS35MG porque supera el torque mínimo de 20kg/cm para activar el mecanismo de captura de muestra de la botella Van Dorn y cuenta con protección IP67.

3.1.5.7 Unidad de Procesamiento y Adquisición

Se seleccionó la Raspberry Pi 4 Model B como unidad de procesamiento y adquisición por su facilidad de programación en Python y amplia disponibilidad de librerías para registro y telemetría. La Pi 4 ofrece GPIO y buses nativos, lo que permite integrar los componentes seleccionados tales como sensores de tensión y corriente por PC y comunicar la sonda multiparamétrica mediante adaptador USB-RS485. Su desempeño y bajo consumo a 5 V la hacen adecuada para operar a bordo del USV. En la Figura 49 se visualiza la unidad de procesamiento y adquisición seleccionada.

Figura 49

Computadora Raspberry Pi 4 Modelo B



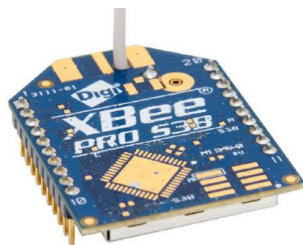
Nota. De “Raspberry Pi 4B 4GB”, por Naylamp Mechatronics, s.f.-a (<https://naylampmechatronics.com/raspberry-pi/742-raspberry-pi-4-b-4gb.html>).

3.1.5.8 Módulo de comunicación para transferencia de datos

Se seleccionó el módulo de telemetría XBee-PRO S3B 900HP como enlace de datos por su alcance (opera en la banda de 900 MHz), robustez y facilidad de integración por UART con la Raspberry Pi. La XBee puede alcanzar una distancia de transmisión de 40 km y tomando como referencia, según Cavero et al (2016), la longitud de la laguna Huampo es 6 km. Por lo tanto, el alcance de la XBee está más que justificado. En la Figura 50 se visualiza el módulo seleccionado.

Figura 50

Módulo de comunicación por radiofrecuencia



Nota. De “XBee-PRO 900HP S3B con antena”, por Creatividad Ahora, s.f. (<https://creatividadahora.com/producto/xbee-pro-900hp-s3b-con-antena/>).

3.1.5.9 Selección de sensor de voltaje

La batería del USV corresponde a la configuración a tres celdas en serie (3S), por lo cual el sistema opera a una tensión nominal de 12 V. Con este valor se establece como criterio de diseño que el sensor de voltaje seleccionado sea compatible con sistemas de 12 V. En la Tabla 8 se presentan los sensores de voltaje comerciales que cumplen con estos requisitos de diseño.

Tabla 5

Selección de sensor de voltaje

Componente	Voltaje operación	Corriente (A)	Rango (V)	Resolución	Peso (kg)	Temperatura de operación	Salida
INA226	3 - 5 V	0.00033	0 a 35	-	0.005	-40 a 125°C	I ² C
INA3221	2.7 - 5.5 V	0.00035	0 a 26	-	0.005	-40 a 125°C	I ² C
Sensor 0-25V	3 - 25 V	-	0 a 25	4.89 mV	-	-	Analógica

Nota. Elaborado a partir de Naylamp Mechatronics (s.f.-b), Electronilab (s.f.-a) y SAISAC MECATRONICA (s.f.).

De las tres alternativas evaluadas para la medición del voltaje de la batería, el sensor INA226 destaca por ofrecer un rango de tensión ampliamente superior a los 12 V requeridos por el sistema. Además, su salida digital mediante interfaz de comunicación I²C facilita la integración con la Raspberry Pi 4B sin necesidad de etapas adicionales de acondicionamiento. Finalmente, presenta el menor consumo de corriente en comparación con las demás opciones.

3.1.5.10 Selección de sensor de corriente

Según la Tabla 6, la sumatoria del consumo de todos los componentes alcanza un máximo de 36.6 A. A partir de este valor se establece como criterio de diseño que el sensor de corriente seleccionado sea capaz de medir 40 A como mínimo, de manera que cubra los picos de consumo con un margen de seguridad adecuado. A continuación, en la Tabla 9 se presentan los sensores de corriente comerciales que cumplen con este requisito de diseño.

Tabla 6*Selección de sensor de corriente*

Componente	Voltaje operación	Corriente (A)	Rango (A)	Resolución	Peso (kg)	Temperatura de operación	Salida
INA226	3 - 5 V	0.00033	0 a 40	0.025 mA	0.005	-40 a 125°C	I ² C
ACS758 (Hall 50 A)	3 - 5 V	0.0135	-50 a 50	40 mV/A	0.0088	-40 a 150°C	Analógica
WCS1600 (Hall 100 A)	5 V	0.006	-100 a 100	22 mV/A	0.0124	-20 a 125°C	Analógica

Nota. Elaborado a partir de Naylamp Mechatronics (s.f.-b), Electronilab (s.f.-b) y Naylamp Mechatronics (s.f.-c).

Para la medición de corriente del sistema se evaluaron tres alternativas: el sensor INA226 que permite reemplazar la resistencia shunt para ampliar su rango de medición, y los sensores de efecto Hall ACS758 de 50 A y el WCS1600 de 100 A. La ventaja principal de los sensores de efecto Hall radica en que la carga está aislada y minimiza la disipación de energía a diferencia de las mediciones de corriente que utilizan resistencia shunt. En particular, el sensor ACS758 de 50 A cumple los requisitos de diseño y resulta adecuado para el consumo máximo estimado de 40 A del USV. Dado que la Raspberry Pi 4B no dispone de entradas analógicas, se plantea complementar dicho sensor con el uso de un convertidor analógico/digital externo, como el ADS1115 con interfaz de comunicación I²C.

3.1.5.11 Cálculo de consumo energético

Con la selección de los actuadores y sensores antes mencionados se hace el cálculo de consumo en Ah en la Tabla 10.

Tabla 7*Cálculo de Ah para determinar la capacidad de la batería*

Subsistema / Equipo	Tensión (V)	Corriente (A)	Factor de uso	Cantidad	Ah (teórico)	Ah (real)
Thruster APISQUEEN U8 290KV	12	11.7	0.85	2	23.4	19.89
Raspberry Pi 4B	5	3	1	1	3	3
Sonda multiparamétrica Aqua TROLL 500	12	0.075	1	1	0.075	0.075
IMU-GPS WITMOTION	5	0.098	1	1	0.098	0.098

Servomotor 9imod	5	1.9	0.2	2	3.8	0.76
Actuador eléctrico lineal	12	3	0.4	2	6	2.4
Total:					36.6	26.3

Nota. Elaborado a partir de APISQUEEN (s.f.), Naylamp Mechatronics (s.f.), In-Situ (s.f.), Wit Motion (s.f.), 9imod (s.f.) y NINGBO (s.f.).

De acuerdo con la Tabla 10, para un desempeño de 1 hora se necesita 26.3A como mínimo. Por lo tanto, considerando perdidas y un margen de seguridad se plantea el uso de una batería de 60Ah en configuración de 3S (12V). Para ello en la Tabla 11 se realizará un análisis que cumpla con los requisitos de consumo y dimensiones de espacio, las cuales son 160mm x 210mm x 130mm.

Tabla 8

Análisis comparativo de baterías

Batería	Voltaje (V)	Capacidad (Ah)	Dimensiones				Cantidad	Dimensiones ocupadas				Capacidad Total (Ah)
			Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)		Ancho (mm)	Largo (mm)	Altura (mm)	Peso (kg)	
ECO-WORTHY 30Ah	12	30	83	183	176	3.2	2	166	183	176	6.4	60
ECO-WORTHY 50Ah	12	50	135	232	181	5.4	1	135	232	181	5.4	50
EXPERT POWER EP12100	12	100	173	330	236	12.2	1	173	330	236	12.2	100
EXPERT POWER EP1235	12	35	132	197	167	4.8	2	264	197	167	9.6	70
EXPERT POWER EP1250	12	50	165	196	168	5.9	1	165	196	168	5.9	50
ENSAMBLAJE PROPIO	12	21	65	152	100	1.3	3	195	152	100	3.8	63

Nota. Elaborado a partir de ECO-WORTHY (s.f.-a), ECO-WORTHY (s.f.-b), EXPERT POWER (s.f.-a), EXPERT POWER (s.f.-b) y EXPERT POWER (s.f.-c).

Las dimensiones de las baterías comerciales no coinciden con el espacio disponible. Por esta razón, se plantea ensamblar una batería utilizando componentes comerciales. Además, como se puede visualizar en la Tabla 7 la batería ensamblada pesa aproximadamente 3.8kg lo cual es mucho menor a las baterías comerciales. Esto permite controlar tanto el espacio y el peso, aspectos muy importantes para poder balancear el peso en el USV y garantizar una mejor estabilidad. Para ello se procederá a listar los siguientes componentes necesarios.

La celda seleccionada es la 18650 de 3000 mA, como se visualiza en la Figura 51. Debido a que, es la más comercial y comúnmente utilizada para ensamblar bancos de batería.

Figura 51

Celda de iones de litio 18650



Nota. La imagen muestra una celda recargable Li-Ion 18650 Sony MR18650 US18650VTC6. Adaptado de “Baterías recargables”, por Electrónica Juana, s.f. (<https://electronicajuana.pe/producto/bateria-de-litio-li-ion-18650-3000ma-sony-murata/>)

Según la norma IEC 62133-2 (2017), dentro de un pack de baterías las celdas no deben estar en contacto directo sin protección. Es de suma importancia que estén debidamente separadas mediante espaciadores, como el que se puede visualizar en la Figura 52.

Figura 52

Separadores de celdas de litio 18650

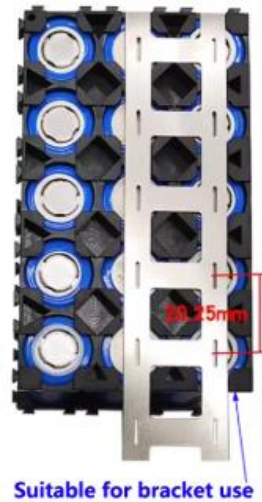


Nota. La imagen muestra separadores modulares para armar paquetes de celdas recargables Li-Ion 18650. Adaptado de “Soporte de batería de litio 18650”, por Digital Zone Store, s.f. (<https://es.aliexpress.com/item/1005004887132758.html>)

Para poder ensamblar una batería en configuración 3S - 7P, se recomienda utilizar tiras de níquel en forma de malla como se visualiza en la Figura 53, ya que esto garantiza una correcta soldadura por puntos. Con la finalidad de evitar sobreponer tiras de níquel encima de otra, lo que genera una soldadura por puntos deficiente.

Figura 53

Tiras de níquel multiparalelo para pilas 18650

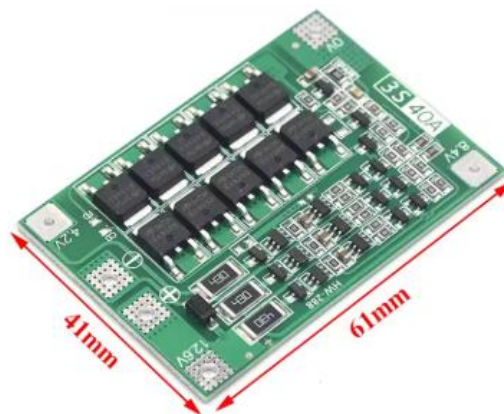


Nota. La imagen muestra tiras de níquel para armar paquetes de celdas recargables Li-Ion 18650. Adaptado de “18650 batería de litio hoja de níquel multiparalelo multi-serie”, por Universal world Store, s.f. (<https://bit.ly/4iCGpD6>)

Garantizar un correcto balanceo de carga y descarga depende del BMS adecuado a utilizar. Por esta razón, se seleccionó un BMS 3S 40A, como se visualiza en la Figura 54.

Figura 54

BMS 3S 40A

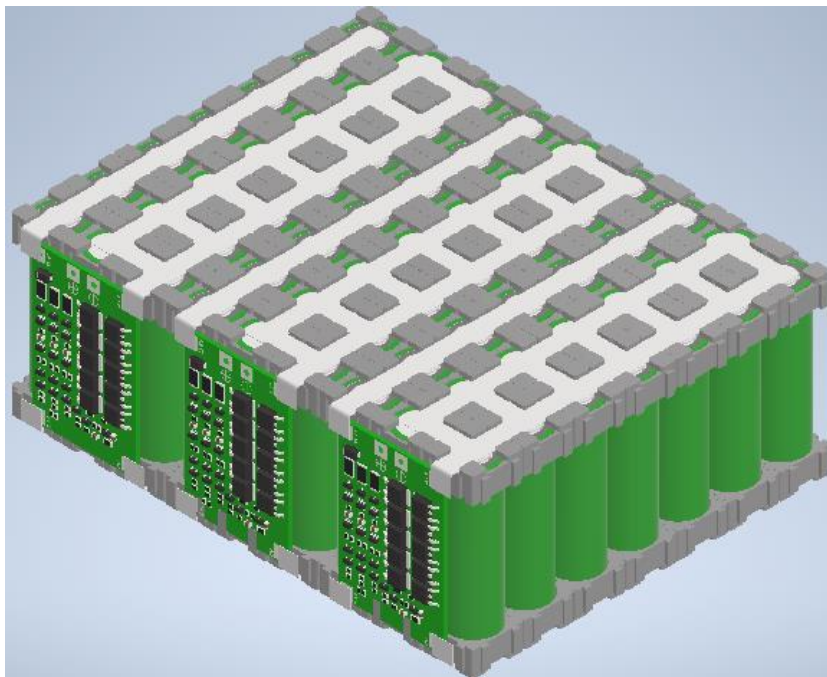


Nota. La imagen muestra un dispositivo electrónico que regula y balancea la carga de una batería de 12V (3S) y con 40A máximo de salida de amperaje. Adaptado de “Placa de protección para cargador de batería de litio 3S 4S 40A 60A, 18650 BMS”, por HNV Official Store, s.f. (<https://urli.info/1jpsj>)

Con los componentes antes mencionados se ensambla la batería como se aprecia en la Figura 55. Cabe resaltar, que es una batería compuesta por 3 paquetes de baterías 3S de 21Ah cada una. Para poder alcanzar 63Ah se tiene que conectar en configuración paralelo. De esta manera la corriente se suma y el voltaje se mantiene. La capacidad de 63Ah brinda una autonomía de 168 minutos, siendo superior a las 120 minutos planteado como requisito.

Figura 55

Ensamblaje de batería 3S 63Ah



El ensamblaje de la batería de ion-litio para el USV favorece el uso de tecnologías de almacenamiento energético más eficientes y de menor impacto ambiental. El empleo de celdas Li-ion tipo 18650, ampliamente estandarizadas y de alta densidad energética, permite minimizar el peso y maximizar la autonomía del sistema.

Considerando un consumo máximo de 30A, la conexión entre la batería Li-ion y los thrusters, se seleccionó cable AWG 10 de cobre estañado tipo marino, conforme a UL-1426. En la Figura 56, se puede visualizar el cable seleccionado el cual ofrece menor

caída de tensión, mayor resistencia a la corrosión y mejor tolerancia a vibración, condiciones necesarias para un USV operando en ambientes húmedos.

Figura 56

Cable marino de cobre estañado



Nota. Se muestra el cable marino estañado. Adaptado de “Harbor Marine”, s.f. (<https://harbormarine.com.pe/producto/ancor-cable-marino-12-2-awg-250-2x3-mm/>)

3.1.5.12 Selección de radiocontrol

La utilización de radiocontrol para poder navegar con el USV es factible, ya que permite la maniobrabilidad para poder dirigirse al punto a obtener las muestras de agua. Como requerimientos mínimos se plantean que el transmisor opere en la banda 2.4 GHz y con un alcance no menor de 200m, ya que a mayor distancia se pierde visibilidad del operador. La utilización de la banda de 2.4 GHz se sustenta con el “Texto Único Ordenado del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones”, Artículo 28, la banda 2400 a 2483,5 MHz (ICM) se determina operación sin licencia bajo condiciones técnicas (Decreto Supremo 020-2007-MTC, 2007). La banda de frecuencias 2400 - 2500 MHz (frecuencia central 2450 MHz), se especifica que aquellos que hagan uso de dichas frecuencias mencionadas deben aceptar interferencia y en ningún caso pueden generar interferencia a aplicaciones ICM (MTC, 2023). De lo anterior se procede a plasmar la Tabla 12 para seleccionar un transmisor que opera en dicha banda de frecuencias. Adicionalmente, el área de operación del transmisor será en zonas alejadas de la población, por lo tanto, no significa causa de interferencia a aplicaciones ICM.

Tabla 9

Análisis comparativo de transmisores

Marca	Modelo	Voltaje (V)	Ancho Banda (kHz)	Rango Radiofrecuencia (GHz)	Resolución por canal	Alcance (Km)
-------	--------	----------------	-------------------------	-----------------------------------	-------------------------	-----------------

FLY SKY	FS-i6X	6	500	2.408 - 2.475	4096	1
TURNIGY	TGY-i6	6	500	2.405 - 2.475	1024	1
RADIOMASTER	Pocket M2	6.6	-	2.400 - 2.480	-	2

Nota. Elaborado a partir de FLY SKY (s.f.), TURNIGY (s.f.) y RADIOMASTER (s.f.).

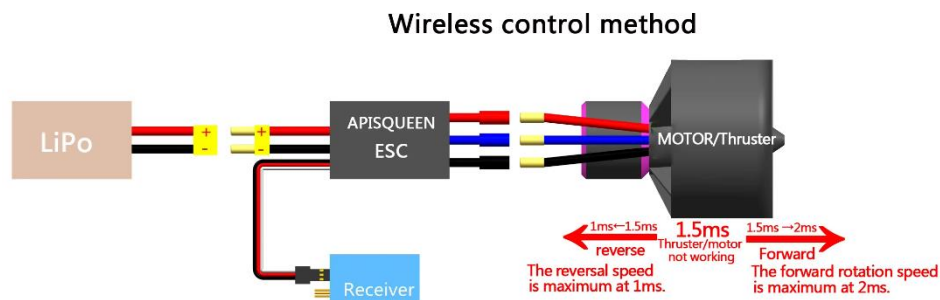
El transmisor seleccionado es el FLYSKY FS-i6X, que permite operar en la banda recomendada de 2.4GHz, supera ampliamente el alcance mínimo de 200m y posee mayor resolución en los canales. Estos canales son los que llevan la señal a los actuadores y tener una mayor resolución significa una mejor maniobrabilidad del USV.

3.1.5.13 Funcionamiento del sistema de propulsión

El sistema de propulsión planteado se basa en la proporcionada por el fabricante de los propulsores seleccionados, tal como se visualiza en la Figura 57.

Figura 57

Esquema de alimentación y control inalámbrico del propulsor con ESC bidireccional

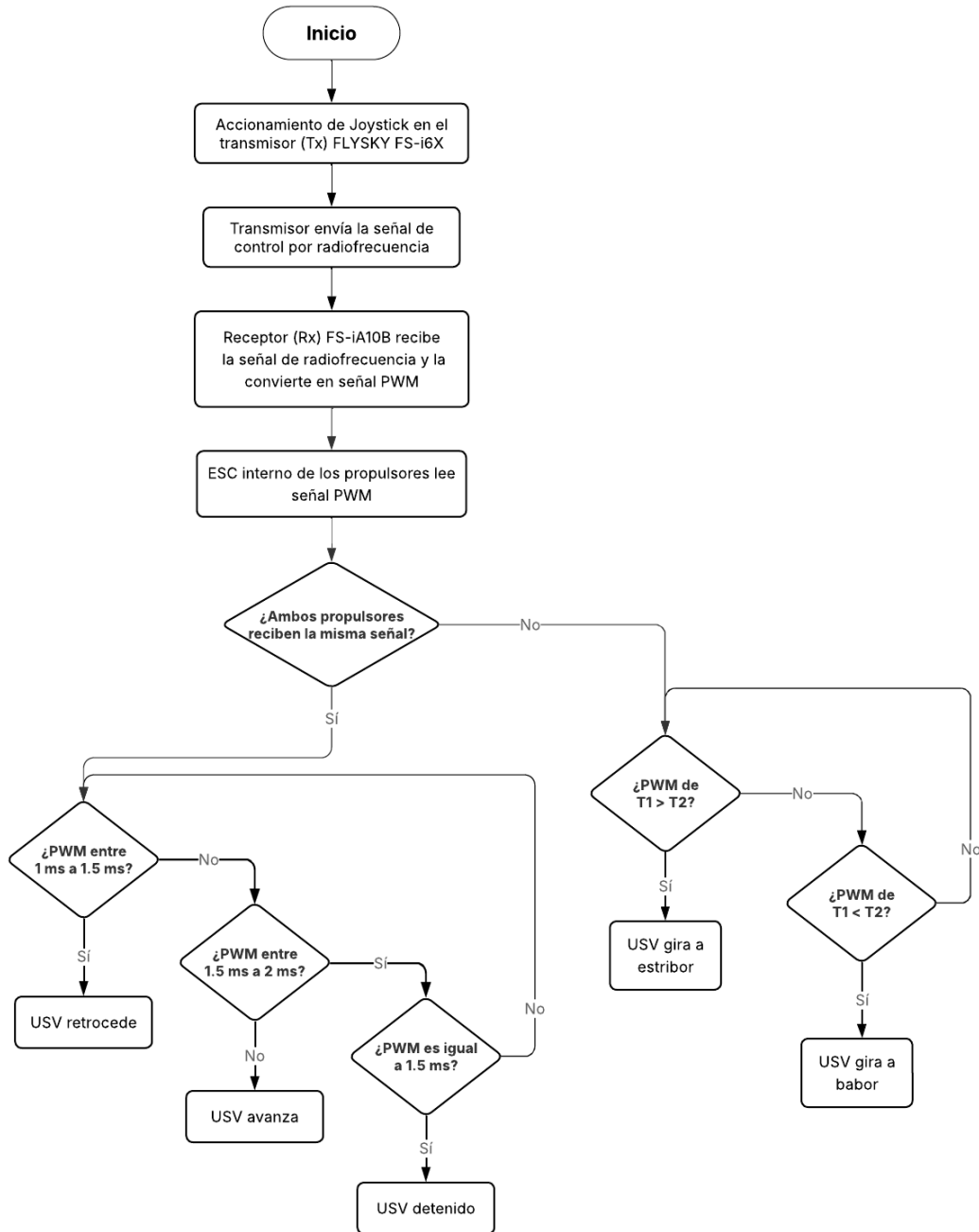


Nota. Adaptado de “Propulsor submarino U8 12V - 24V 7 kg de empuje con ESC adecuado para ROV y barcos”, por APISQUEEN, 2025 (<https://www.underwaterthruster.com/es/products/propulsor-submarino-u8-12v-24v-7kg-de-empuje-con-esc-adecuado-para-rov-y-barcos-1?variant=42647081418980>).

El método de control consta en accionar el joystick del transmisor FLYSKY FS-i6X y este genera las señales que son enviadas por radiofrecuencia hacia el receptor FS-iA10B. Este convierte la señal recibida en señal PWM, el cual es leído por el ESC interno del propulsor. Dependiendo de la señal el propulsor girará generando el avance, paro o retroceso. En el Anexo 4, se detalla el conexionado del receptor y los actuadores involucrados. A continuación, en la Figura 58 se visualiza el diagrama del funcionamiento del sistema de propulsión y navegación por radiocontrol.

Figura 58

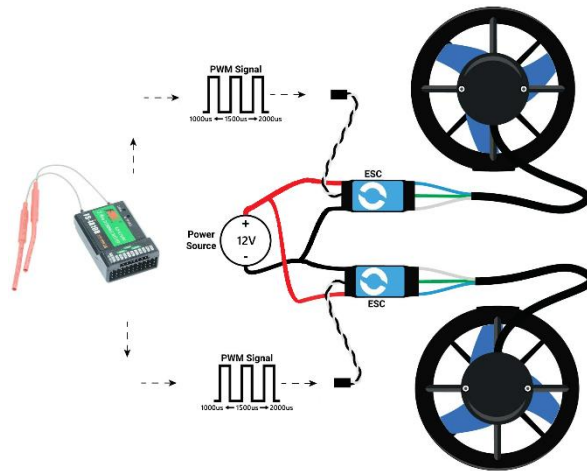
Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de propulsión por radiocontrol



En la Figura 59, se plantea el conexionado del sistema de propulsión y navegación mediante radiocontrol. En la imagen se puede visualizar la alimentación de los propulsores y sus ESC desde la batería, así como la generación y aplicación de la señal PWM de control que gobierna la velocidad y sentido de giro del propulsor.

Figura 59

Esquemático del sistema de propulsión y navegación por radiocontrol del USV

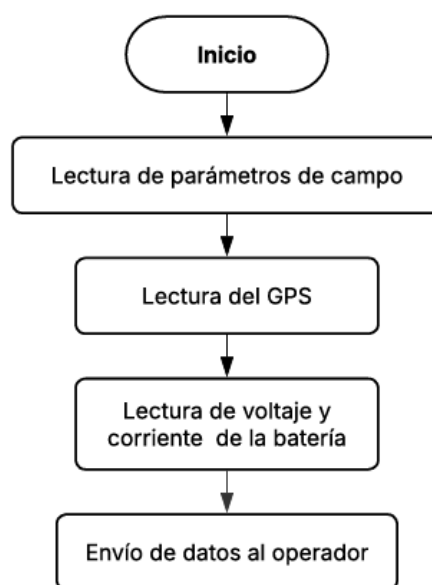


Nota. La imagen muestra el esquema de conexión de los propulsores y sus ESC a la batería, así como la señal PWM de control generada por el sistema de radiocontrol. Elaborado a partir de Blue Robotics (2025) y Flying Tech (2025).

En la Figura 60, se detalla el procedimiento para realizar la lectura de los parámetros de campo de la sonda multiparamétrica, posición del USV a través del GPS y medición de la corriente y voltaje de la batería. Adicionalmente, en el Anexo 3 se detalla el conexionado de los sensores a la unidad de procesamiento y adquisición.

Figura 60

Diagrama de flujo de lectura de sensores

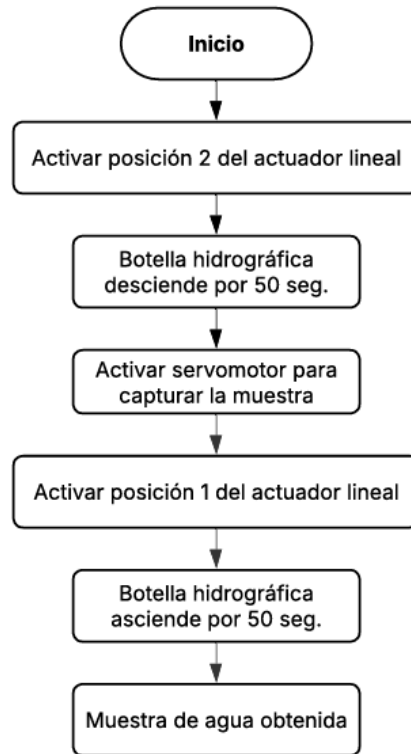


En el Anexo 5, se visualiza el conexionado para que el operador pueda recibir los datos enviados desde el USV.

Finalmente, en la Figura 61 se visualiza el procedimiento por el cual se realiza la captura de la muestra de agua.

Figura 61

Diagrama de flujo del procedimiento para toma de muestras de agua



3.2 Resultados Esperados

De acuerdo con el modelo de masas elaborado en Autodesk Inventor, en la Tabla 13 se resumen los pesos de los principales sistemas del USV.

Tabla 10

Distribución de pesos del USV por sistemas

Sistema	Peso (kg)
Estructura del USV	21.25
Sistema de muestreo	8.35
Sistema de monitoreo	1.08
Estructura de GPS y módulo de comunicación	0.25

En conjunto, la masa total estimada del USV en condición de operación es de 40.13 kg. Según el análisis hidrostático realizado en ANSYS, el ensamblaje completo puede soportar 41.76 kg, por lo que existe un margen de aproximadamente 1.6 kg respecto a la carga considerada. Este margen indica que el USV dispone de flotación suficiente para soportar su peso total y mantenerse a flote con normalidad bajo las condiciones de operación previstas en aguas protegidas.

Se entiende por carga útil la masa correspondiente a los equipos y sistemas que la embarcación transporta para cumplir su misión, excluyendo la estructura del casco. En la Tabla 14 se resumen los componentes de la carga útil asociada al sistema de medición y muestreo, que en conjunto representan 9.68 kg. Considerando el margen disponible de 1.6 kg obtenido del análisis hidrostático, se obtiene una capacidad máxima de carga útil de aproximadamente 11.28 kg, superando la carga útil mínima de 10 kg establecida en los objetivos del proyecto y manteniendo las condiciones de flotación previstas para el USV.

Tabla 11

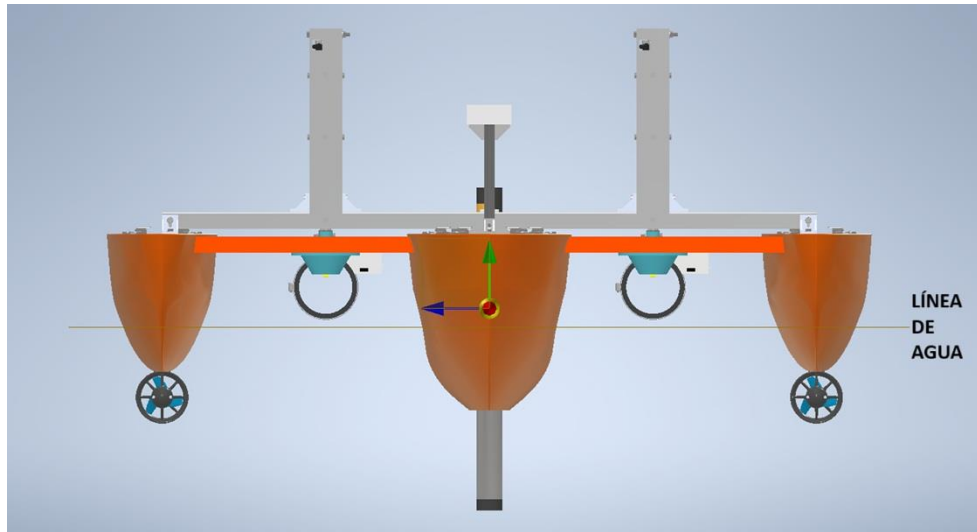
Resumen de la carga útil del USV

Descripción de la carga útil	Peso (kg)
Sistema de muestreo	8.35
Sistema de monitoreo	1.08
Electrónica asociada	0.25

En condición de carga máxima, la altura metacéntrica transversal resultó positiva, lo que evidencia que el USV genera un momento restaurador ante pequeñas escoras y es estable transversalmente. Asimismo, en la Figura 62 se presenta la ubicación del centro de gravedad respecto a la línea de agua de diseño, lo que permite visualizar la relación entre el G y el metacentro transversal obtenidos. El cálculo se realizó solo con los parámetros hidrostáticos del casco principal, por lo que constituye una estimación conservadora, dado que los flotadores laterales aumentan el momento de inercia de la superficie de flotación y la estabilidad real del trimarán.

Figura 62

Ubicación del centro de gravedad y línea de agua desde la vista frontal del USV



En el sistema de monitoreo, el análisis estructural en ANSYS mostró un factor de seguridad cercano a 15, indicando que el soporte de la sonda trabaja muy por debajo de su capacidad resistente y ofrece un comportamiento confiable. A pesar de este valor elevado, no se redujeron sus dimensiones, pues se prioriza una configuración robusta frente a vibraciones, impactos y posibles sobrecargas no consideradas en el modelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas del prototipo preliminar, se identificaron varios factores que afectaban el desempeño del USV: inestabilidad de la embarcación, línea de flotación demasiado próxima a la cubierta, dimensiones inadecuadas de los compartimentos, desbalance en la distribución del peso y una carga útil inferior a la prevista. A partir de estos hallazgos se replanteó el diseño mecánico, incorporando criterios de ingeniería y las normas correspondientes para corregir dichas deficiencias. Como resultado, el nuevo diseño presenta una estabilidad adecuada, validada mediante un GMt positivo, y un centro de gravedad ubicado próximo a la línea de flotación de diseño. Asimismo, las simulaciones muestran una línea de flotación más alejada de la cubierta, respetando el francobordo mínimo recomendado. Finalmente, los compartimentos se redistribuyeron y ampliaron, lo que incrementa la carga útil disponible y permite la incorporación de otros componentes. En la Tabla 12, se puede visualizar todos estos aspectos relevantes.

Tabla 12*Comparación de prototipo preliminar y diseño actual del USV*

Aspecto	Prototipo preliminar	Diseño actual
Estabilidad de la embarcación	Inestabilidad del USV.	Estabilidad adecuada, validada mediante un valor de GMt positivo.
Posición de la línea de flotación	Línea de flotación muy cercana a la cubierta.	Línea de flotación más alejada de la cubierta, respetando el francobordo mínimo recomendado.
Posición del centro de gravedad	Centro de gravedad no controlado adecuadamente.	Centro de gravedad ubicado próximo a la línea de flotación de diseño.
Dimensiones y distribución de compartimentos	Dimensiones inapropiadas y distribución poco eficiente.	Compartimentos mejor distribuidos y de mayores dimensiones.
Distribución del peso	Desbalance en la distribución del peso.	Distribución de masas más equilibrada en la embarcación.
Carga útil	Carga útil inferior a la esperada.	Mayor carga útil disponible, permitiendo la incorporación de componentes adicionales.
Criterios y normas de diseño	Diseño sin considerar plenamente criterios y normas aplicables.	Replanteo del diseño mecánico incorporando criterios de ingeniería y normas pertinentes para corregir deficiencias.

Como resultado del desarrollo del sistema de propulsión y navegación por radiocontrol del USV, se definió una arquitectura basada en propulsores eléctricos de corriente continua gobernados mediante controladores electrónicos de velocidad (ESC) bidireccionales. Cada propulsor es alimentado a 12 V desde el banco de baterías del vehículo y se cableó con conductor marino de calibre adecuado, garantizando la caída de tensión admisible y la capacidad de corriente requerida para el empuje máximo de operación.

El gobierno del USV se realiza mediante un transmisor de radiocontrol FLYSKY FS-i6X y su receptor FS-iA10B. El receptor entrega una señal PWM estándar (1 a 2 ms) hacia los ESC de los propulsores, de modo que el punto medio de 1,5 ms corresponde al paro del motor, mientras que los pulsos cercanos a 1 ms y 2 ms generan respectivamente el giro

en reversa y el giro en avance. Con esta configuración se obtuvo un control proporcional y continuo del empuje, permitiendo ejecutar maniobras de avance, detención y retroceso del USV desde el punto del operador.

El esquema de conexión entre batería, ESC y propulsor se basó en los diagramas de aplicación del fabricante, adaptándolos al caso del trimarán propuesto.

El ensamblaje de la batería a partir de celdas de iones de Litio tipo 18650 permite controlar el peso y espacio, aspectos muy relevantes para distribuir la carga en el USV.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El análisis hidrostático en ANSYS indica que los cascos del trimarán pueden soportar hasta 41.76 kg manteniendo el calado de diseño. Como la masa del USV en operación (40.13 kg, incluyendo el agua de muestreo) es inferior a este valor, se verifica que el diseño cumple con la flotabilidad requerida en aguas protegidas.
- El diseño del USV se ha alineado con los criterios estructurales, de estanqueidad y estabilidad de la categoría D, tomando como referencia las normas ISO aplicables. Aunque estas se dirigen a embarcaciones tripuladas, su adaptación al contexto no tripulado aporta respaldo normativo y mayor robustez al trimarán.
- Se diseñó un sistema de toma de muestras integrado al USV para operar con 2 botellas Van Dorn de 2 L, capaz de descenderlas a la profundidad requerida sin contaminación previa y con una estructura en perfiles de aluminio verificada por análisis de esfuerzos.
- El cálculo de la altura metacéntrica transversal confirma que el trimarán presenta estabilidad transversal en la condición de carga máxima, resultado obtenido de forma conservadora al emplear solo los parámetros hidrostáticos del casco principal.
- Se integró un sistema de monitoreo con sonda multiparamétrica sobre un soporte dedicado en popa, cuya estructura fue verificada mediante análisis en ANSYS para soportar las cargas de operación, permitiendo medir los parámetros de calidad de agua requeridos sin comprometer la estabilidad ni la operación del USV.
- La integración del transmisor FLYSKY FS-i6X con el receptor FS-iA10B permitió implementar un esquema de control proporcional mediante señales

PWM, logrando un gobierno continuo del empuje en avance, paro y retroceso. De este modo se cumple el objetivo de navegación por radiocontrol, asegurando maniobrabilidad del USV desde el punto de ubicación del operador.

- El conexionado batería, ESC y propulsor, junto con la selección de conductores marinos de calibre adecuado, garantiza la capacidad de corriente requerida y mantiene la caída de tensión dentro de límites aceptables para la tensión nominal de 12 V. Esto contribuye a la fiabilidad del sistema de propulsión y reduce el riesgo de sobrecalentamiento en operación continua.
- Finalmente, en las pruebas del prototipo preliminar se identificaron varios problemas que afectaban el desempeño del USV: inestabilidad, línea de flotación muy cercana a la cubierta, compartimentos mal dimensionados, desbalance de peso y baja carga útil. Con el replanteamiento del diseño mecánico, incorporando criterios de ingeniería y normas técnicas, se corrigieron estos aspectos, logrando mayor estabilidad, mejor distribución interna y un aumento de la carga útil disponible.

4.2 Recomendaciones

- Al realizar el mallado en ANSYS y evaluar la prueba de *skewness* se observó que un refinamiento excesivo de la malla no garantiza una mejor calidad ni mayor estabilidad numérica. Por ello, se recomienda que futuros análisis incluyan un estudio de sensibilidad de malla que priorice la calidad de los elementos por sobre el simple aumento del número de nodos.
- Considerando que el margen entre la masa en operación (40.13 kg) y la capacidad máxima estimada (41.76 kg) es reducido, se recomienda gestionar cuidadosamente la carga útil (equipos adicionales, volumen de agua de muestra, futuras ampliaciones de instrumentación) y evaluar, en versiones posteriores, opciones de aligeramiento del casco o de la estructura del sistema de muestreo.
- Al construir el vehículo, se recomienda realizar una validación experimental completa de flotación y estabilidad conforme a la ISO 12217-3, así como verificar los espesores del casco y las tapas de acceso y registros de acuerdo con las ISO 12215 e ISO 12216, a fin de contrastar el comportamiento real del USV con los criterios normativos considerados en el diseño.
- Para la instalación del sistema de propulsión se recomienda adoptar cableado marino certificado bajo la norma UL 1426.

- Para el ensamblaje del banco de baterías se recomienda guiarse de la norma IEC 62133-2 con la finalidad de garantizar una adecuada fijación y separación de las celdas de iones de Litio 18650 evitando fricción, movimiento o daño durante vibraciones y golpes.
- Dado que el sistema de gobierno depende del enlace de radiocontrol, se aconseja verificar el cumplimiento de la normativa nacional aplicable al uso del espectro radioeléctrico y realizar pruebas de alcance y pérdida de señal (failsafe).
- Asimismo, se recomienda separar físicamente los cables de potencia de los cables de señal PWM para reducir interferencias electromagnéticas en los canales de control.

5 REFERENCIAS

9imod Official Store. (s.f.). *Servo sin escobillas resistente al agua 9imod, 45KG, 35KG, 25KG, engranaje de Metal, Servo Digital HV para coche RC, barco, Robot, Servo RC DIY*. Alibaba. Recuperado el 23 de octubre de 2025, de <https://es.aliexpress.com/store/503869?spm=a2g0o.detail.0.0.506dXMuPXMuPBI>

ANSYS. (2025). *ANSYS Meshing User's Guide*. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=//Views/Secured/corp/v252/en/wb_msh/msh_book_wb.html

APISQUEEN. (s.f.). *Propulsor submarino U8 12V - 24V 7Kg de empuje con ESC adecuado para ROV y barcos*. Underwater Thruster. Recuperado el 20 de octubre de 2025, de <https://www.underwaterthruster.com/es/products/propulsor-submarino-u8-12v-24v-7kg-de-empuje-con-esc-adecuado-para-rov-y-barcos-1?variant=42647081418980>

Aquatic BioTechnology. (2023, 4 de octubre). *Van Dorn bottle - Aquatic BioTechnology*. Aquatic BioTechnology – Creating instruments for aquatic ecosystem research. Recuperado el 16 de noviembre de 2025, de <https://aquaticbiotechnology.com/en/water-sampling/van-dorn-bottle>

Atlas Steels. (2021). *Aluminium Alloy 6063 Data Sheet*. <https://atlassteels.com.au/aluminium-alloy-datasheets/>

- Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-recursos-hidricos-superficiales>
- Balbuena, J. (2017). *Diseño de un USV para el monitoreo de calidad de agua y toma de muestras en lagos* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/3dafd8e1-6f79-476e-99a2-0154346b0cd5>
- Balbuena, J., Bucknall, R., Cuellar, R., Quiroz, D., & Song, R. (2017, 18-21 de setiembre). *Design and Implementation of an USV for Large Bodies of Fresh Waters at the Highlands of Peru*. [Conferencia]. OCEANS 2017 – Anchorage, AK, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8232168>
- Blue Robotics. (s.f.). *T200 Thruster*. Recuperado el 25 de noviembre de 2025, de <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>
- Britannica Editors. (2025, 22 de junio). *Naval architecture | Development & Principles*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://www.britannica.com/technology/naval-architecture>
- Cavero, J., Manrique, M., Zavalaga, F., Chang, F., Bouchon, M., & Aguilar, C. (2020). Fitoplancton en tres lagunas altoandinas de la provincia ambo, región huánuco, Perú. *Informe Instituto del Mar del Perú*, 47(3), 357-366. https://biblioteca.imarpe.gob.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=24175
- Comisión Electrotécnica Internacional. (2017). Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Safety requirements for portable sealed secondary cells, and for batteries made from them, for use in portable applications - Part 2: Lithium systems (Norma IEC No. 62133-2:2017). <https://webstore.iec.ch/en/publication/32662>
- Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. (2016). *Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica Ambiental*. https://portal.concytec.gob.pe/images/noticias/CINTyA_consulta_publica.pdf

- Creatividad Ahora. (s.f.). *XBee-PRO 900HP S3B con antena* [Fotografía].
<https://creatividadahora.com/producto/xbee-pro-900hp-s3b-con-antena/>
- de Andrade, E., Sales, J., & Fernandes, A. (2025). Operative Unmanned Surface Vessels (USVs): A Review of Market-Ready Solutions. *Automation*, 6(2), 17.
<https://doi.org/10.3390/automation6020017>
- Decreto Supremo 004-2017-MINAM. (2017). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. Ministerio del Ambiente.
- Decreto Supremo 020-2007-MTC. (2007). *Aprueban Texto Único Ordenado del Reglamento General de la Ley de Telecomunicaciones*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Decreto Supremo 023-2021-MINAM. (2021). *Decreto Supremo que aprueba la Política Nacional del Ambiente al 2030*. Ministerio del Ambiente.
- Díaz, R. (2019). *Diseño e Implementación de un Vehículo de Superficie no Tripulado Provisto de un Sistema de Adquisición de Datos en Tiempo Real Para la Inspección de Calidad de Agua y Análisis de Muestras en Lagos* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional – Universidad Católica de Santa María
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8945>
- Digital Zone Store. (s.f.). *Soporte de batería de litio 18650* [Fotografía].
<https://es.aliexpress.com/item/1005004887132758.html>
- Dreamtech LMS. (s.f.). *Motor cilíndrico compacto FTG50*. Recuperado el 23 de octubre de 2025, de <https://www.dlms.co.kr/FTG50%EC%86%8C%ED%98%95%EC%8B%A4%EB%A6%B0%EB%8D%94%EB%AA%A8%ED%84%B0>
- ECO-WORTHY. (s.f.-a). *Batería Litio LiFePO4 12V 30Ah*. Recuperado el 16 de octubre de 2025, de <https://es.eco-worthy.com/products/bateria-litio-lifepo4-12v-30ah>
- ECO-WORTHY. (s.f.-b). *Batería Litio LiFePO4 12V 50Ah*. Recuperado el 16 de octubre de 2025, de <https://es.eco-worthy.com/products/bateria-litio-lifepo4-12v-50ah>

- Electrónica Juana. (s.f.). *Batería de Litio Li-Ion 18650 3000mA Sony Murata* [Fotografía]. <https://electronicajuana.pe/producto/bateria-de-litio-li-ion-18650-3000ma-sony-murata/>
- Electronilab. (s.f.-a). *Sensor de Voltaje y Corriente INA3221 Tres canales I2C 26V*. Recuperado el 15 de noviembre de 2025, de <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-voltaje-y-corriente-ina3221-tres-canales-i2c-26v/?srsltid=AfmBOoonsUTdd3PDEtPKD47pk3ZDSZBXMozHdpAa7tEQbkwJgXmnN1B>
- Electronilab. (s.f.-b). *Sensor Corriente Efecto Hall 50A CJMCU-758 ACS758LCB-050B-PFF-T*. Recuperado el 15 de noviembre de 2025, de <https://electronilab.co/tienda/sensor-corriente-efecto-hall-50a-cjmcu-758-acs758lcb-050b-pff-t/?srsltid=AfmBOoohzMV6O2F9tzLfDrbtIpbjXQYGISdxnQJDLEIId3HdtvFEFkMmF>
- ESSS. (2016, 24 de junio). *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿que es?*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://www.esss.com/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- EXPERT POWER. (s.f.-a). *12V 100Ah LiFePO4 - EP12100 Bluetooth*. Recuperado el 16 de octubre de 2025, de <https://www.expertpower.us/products/12v-100ah-lifepo4-ep12100-bluetooth?srsltid=AfmBOoqkzism7JeOPygCcn6TP44HLjxsAA87dy8Vla1Hv9-AcvoTJPEL>
- EXPERT POWER. (s.f.-b). *12V 35Ah LiFePO4 - EP1235*. Recuperado el 16 de octubre de 2025, de https://www.expertpower.us/products/12v-35ah-lifepo4-ep1235?srsltid=AfmBOoptcNSZHxqz6YKXTG689UN_CxQ9e6qO_CcmpR3xy3Rfwasenj0H
- EXPERT POWER. (s.f.-c). *12V 50Ah LiFePO4 - EP1250*. Recuperado el 16 de octubre de 2025, de https://www.expertpower.us/products/ep1250-50ah?srsltid=AfmBOoovf8X3cUV7wMFgrVQbdzujJu4tGSGarwFW2kPmXPM_1TRIOIVd
- FLY SKY. (s.f.). *FS-i6X*. Recuperado el 1 de noviembre de 2025, de <https://www.flysky-cn.com/fsi6x>
- Flying Tech. (s.f.). *FlySky FS-iA10B 10CH 2.4Ghz AFHDS Receiver (Rx) with PPM & Telemetry*. Recuperado el 25 de noviembre de 2025, de

<https://www.flyingtech.co.uk/product/flysky-fs-ia10b-10ch-2-4ghz-afhds-receiver-rx-with-ppm-telemetry/>

Fuzhou Bringsmart Intelligent Tech. (s.f.). *300mm 450mm 80mm 6000N 1000 kg Motor tubular telescópico 24V 12 voltios Torque de alta velocidad 24 "Actuador lineal micro eléctrico 12 V*. Alibaba. Recuperado el 23 de octubre de 2025, de https://www.alibaba.com/product-detail/300mm-450-Mm-50mm-Industrial-Telescopic_1600714362783.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.4bed1f0bXfdFI5&s=p

HANNA Instruments. (s.f.). *HI9829-10101. Medidor multiparamétrico de pH/ORP, CE, OD, c/GPS, sonda 10 metros de cable, 115V*. Recuperado el 28 de octubre de 2025, de <https://hannainst.com.pe/productos/linea/acuacultura/medidor-multiparametrico-de-ph-orp-ce-od-c-gps-sonda-10-metros-de-cable-115v/>

Harbor Marine. (s.f.). *Ancor, cable marino 12/2 AWG 250 (2x3 mm²)* [Fotografía]. <https://harbormarine.com.pe/producto/ancor-cable-marino-12-2-awg-250-2x3-mm/>

HNV Official Store. (s.f.). *Placa de protección para cargador de batería de litio 3S 4S 40A 60A, 18650 BMS* [Fotografía]. <https://urli.info/1jpsj>

Hobby Water. (s.f.). *TD7 10-30V 6.7KG 450W ROV USV AUV Underwater Thruster*. Recuperado el 20 de octubre de 2025, de <https://www.hobbywater.com/products/dd-td7-10-30v-7-8kg-450w-rov-usv-auv-high-efficient-underwater-thruster?variant=41030789365950>

In-Situ. (s.f.). *Aqua TROLL 500 Multiparameter Sonde*. Recuperado el 28 de octubre de 2025, de <https://in-situ.com/es/aqua-troll-500-multiparameter-sonde>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2018). IEEE Standard for Radio-Frequency Energy and Current-Flow Symbols. *IEEE Xplore*. <https://ieeexplore.upc.elogim.com/document/8486934>

Lee, R. (2020, 13 de agosto). *Diccionario Náutico*. Scribd. Recuperado el 14 de noviembre de 2025, de <https://es.scribd.com/document/472298992/DICCIONARIO-NAUTICO-docx>

- Mamani, M. (2024). *Monitoreo ambiental y análisis de la contaminación del agua del lago Chinchaycocha, Junín 2022* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/9683>
- Mendoza, P. (2025, 1 abril). *¿Qué es un Trimarán? Tipos, Usos y Diferencias con Catamaranes*. Narzea Yates. Recuperado el 25 de octubre de 2025, de <https://narzeayates.com/que-es-un-trimaran/>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Plan Nacional de Atribución de Frecuencias - PNAF*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4587069/Plan%20Nacional%20de%20Atribuci%C3%B3n%20de%20Frecuencias%20-%20PNAF%20%282023%20-%20EDITABLE%29.pdf?v=1684771048>
- Ministerio del Ambiente. (2023, julio). *Agenda de Investigación Ambiental al 2030*. <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/Agenda%20de%20Investigacion%20Ambiental%20al%202030%20VF.pdf>
- Nautilus Shipping. (2023, 25 de febrero). *Form Coefficients of Ship – Block, Midship, Waterplane and Prismatic Coefficient*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://nautilusshipping.com/news-and-insights/form-coefficient-of-ship>
- Naylamp Mechatronics. (s.f.-a). *Raspberry Pi 4 B 4GB* [Fotografía]. <https://naylampmechatronics.com/raspberry-pi/742-raspberry-pi-4-b-4gb.html>
- Naylamp Mechatronics. (s.f.-b). *Monitor de corriente voltaje, high/low side INA226*. Recuperado el 15 de noviembre de 2025, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/560-monitor-de-corriente-voltaje-highlow-side.html>
- Naylamp Mechatronics. (s.f.-c). *Sensor de Corriente DC/AC 100A WCS1600*. Recuperado el 15 de noviembre de 2025, de <https://naylampmechatronics.com/sensores-corriente-voltaje/443-sensor-de-corriente-dc-ac-100a-wcs1600.html>
- Ningbo. (s.f.). *Actuador lineal Micro lineal con soporte de montaje, DC 12V, 1000N, 150mm, 200mm, 250mm, carga máxima de 1600N*. Alibaba. Recuperado el 23 de octubre de 2025, de <https://www.alibaba.com/product-detail/DC-12V-1000N->

[Linear-Actuator-150mm_1600590506208.html?spm=a2700.wholesale.you_may_like.4.3b48700fyfqWjp](https://www.nissan-togo.com/media/52xfaerc/urvan-lhd-eng.pdf)

Nissan Africa. (2025). *Nissan NV350 URVAN*. <https://www.nissan-togo.com/media/52xfaerc/urvan-lhd-eng.pdf>

OceanAlpha Group Ltd. (2019, 4 de julio). *ESM30 conducts autonomous water sampling and monitoring*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de https://oceanalpha.com/application_cases/esm30-conducts-autonomous-water-sampling-and-monitoring/

OceanAlpha Group Ltd. (2024, 20 de junio). *ME120 / Hydrographic Unmanned Surface Vehicle*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://oceanalpha.com/product-item/me120/>

Open Ocean Robotics. (s.f.). *Uncrewed Surface Vehicles*. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://www.openoceanrobotics.com/uncrewed-surface-vehicles>

Organización Internacional de Normalización. (2019). *Small craft — Hull construction and scantlings. Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination* (Norma ISO No. 12215-5:2019). <https://www.iso.org/standard/69552.html>

Organización Internacional de Normalización. (2020a). *Small craft — Principal data* (Norma ISO No. 8666:2020). <https://www.iso.org/standard/79071.html>

Organización Internacional de Normalización. (2020b). *Small craft — Windows, portlights, hatches, deadlights and doors — Strength and watertightness requirements* (Norma ISO No. 12216:2020). <https://www.iso.org/standard/69553.html>

Organización Internacional de Normalización. (2022). *Small craft — Stability and buoyancy assessment and categorization. Part 3: Boats of hull length less than 6 m* (Norma ISO No. 12217-3:2022). <https://www.iso.org/standard/79074.html>

Organización Internacional de Normalización. (s.f.). *ISO: Normas mundiales para bienes y servicios de confianza*. Recuperado el 10 de octubre de 2025, de <https://www.iso.org/es/home>

- Osses, J. (2016, 12 de diciembre). *El método de volúmenes finitos*. ESSS. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://www.esss.com/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- Qadir, M., Mumtaz, R., Manzoor, M., Saleem, M., Khan, M., & Charlesworth, S. (2024). Unmanned surface vehicle for intelligent water quality assessment to promote sustainable human health. *Water Supply*, 24 (7), 2259–2270. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.141>
- RADIOMASTER. (s.f). *Pocket Radio Controller (M2)*. Recuperado el 1 de noviembre de 2025, de <https://radiomasterrc.com/products/pocket-radio-controller-m2>
- Resolución Jefatural 010-2016-ANA. (2016). *Aprueban el “Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales”*. Autoridad Nacional del Agua.
- Resolución Ministerial 0597-2023-MTC/01.03. (2023). *Aprueban el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias - PNAF*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Resolución Ministerial 121-2022-MINAM. (2022). *Establecen los ejes temáticos de investigación ambiental 2022-2030, en el marco de la Política Nacional del Ambiente al 2030*. Ministerio del Ambiente.
- Resolución Ministerial 237-2023-MINAM. (2023). *Aprueban la “Agenda de Investigación Ambiental al 2030”*. Ministerio del Ambiente.
- Resolución Ministerial 358-2003-MTC/03. (2003). *Normas técnicas del servicio de radiodifusión*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Rosales, S., & Blanco, J. (2019, noviembre). *Circulación del Lago Titicaca en las estaciones Seca y Húmeda*. https://rnia.produce.gob.pe/wp-content/uploads/2019/11/502_circulacion_titicaca_en_estaciones_seca_humeda.pdf
- SAISAC MECATRONICA. (s.f.). *SENSOR DE VOLTAJE 0-25V DC*. Recuperado el 15 de noviembre de 2025, de <https://mecatronica.saisac.pe/producto/sensor-de-voltaje-0-25v-dc/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020, 30 de julio). *Conocer los datos hidrometeorológicos del Perú*. Gob.pe. Recuperado el 5 de setiembre de

2025, de <https://www.gob.pe/9313-conocer-los-datos-hidrometeorologicos-del-peru>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (s.f.). *Datos Hidrometeorológicos a Nivel Nacional* [Fotografía]. <https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=estaciones>

TURNIGY. (s.f.). *Turnigy TGY-i6 AFHDS transmisor y el receptor 6CH (Modo 2)*. HobbyKing. Recuperado el 1 de noviembre de 2025, de https://hobbyking.com/es_es/turnigy-tgy-i6-mode-2-afhds-transmitter-and-6ch-receiver.html?srsltid=AfmBOor2Q72pK5-j_wK5k5SUCzyHOKBpYImUocmTVU5ZGGcrLFYC3Rsu&__store=es_es

Underwriters Laboratories. (2010). *Electrical Cables for Boats (Norma UL No. 1426)*. <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?UniqueKey=21688>

Universal World Store. (s.f.). *18650 batería de litio hoja de níquel multiparalelo multi-serie* [Fotografía]. <https://bit.ly/4iCGpD6>

Vasco. (s.f.). *BATHYDRONE Aquatic Drone VASCO*. Bathydrone-USV. Recuperado el 11 de octubre de 2025, de <https://www.bathydrone-usv.com/en/vasco>

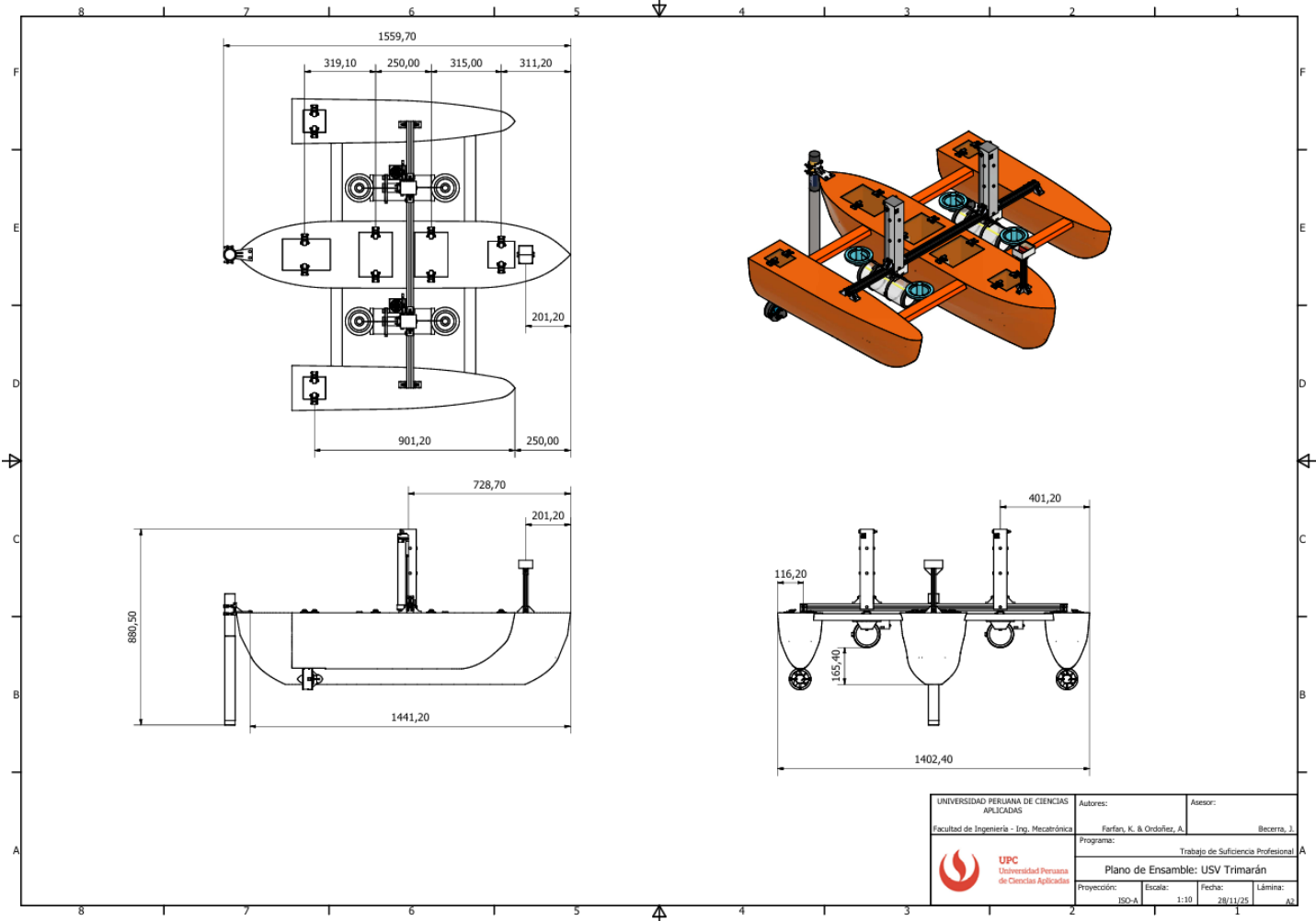
Wishiot Store. (s.f.). *4 Uds 40KG Dsservo DS3240 alto par Digital 180/270 grados engranaje de Metal impermeable Baja Servo para coche trepador de control remoto a escala 1/8 1/10*. Alibaba. Recuperado el 23 de octubre de 2025, de <https://es.aliexpress.com/store/1102410038?spm=a2g0o.detail.0.0.753acuexcuehxhS>

Wit Motion. (s.f.). *WTGAHRS1 Ten-axis inertial navigation sensor*. Recuperado el 18 de octubre de 2025, de <https://www.wit-motion.com/InertialNavigationSensor/36.html>

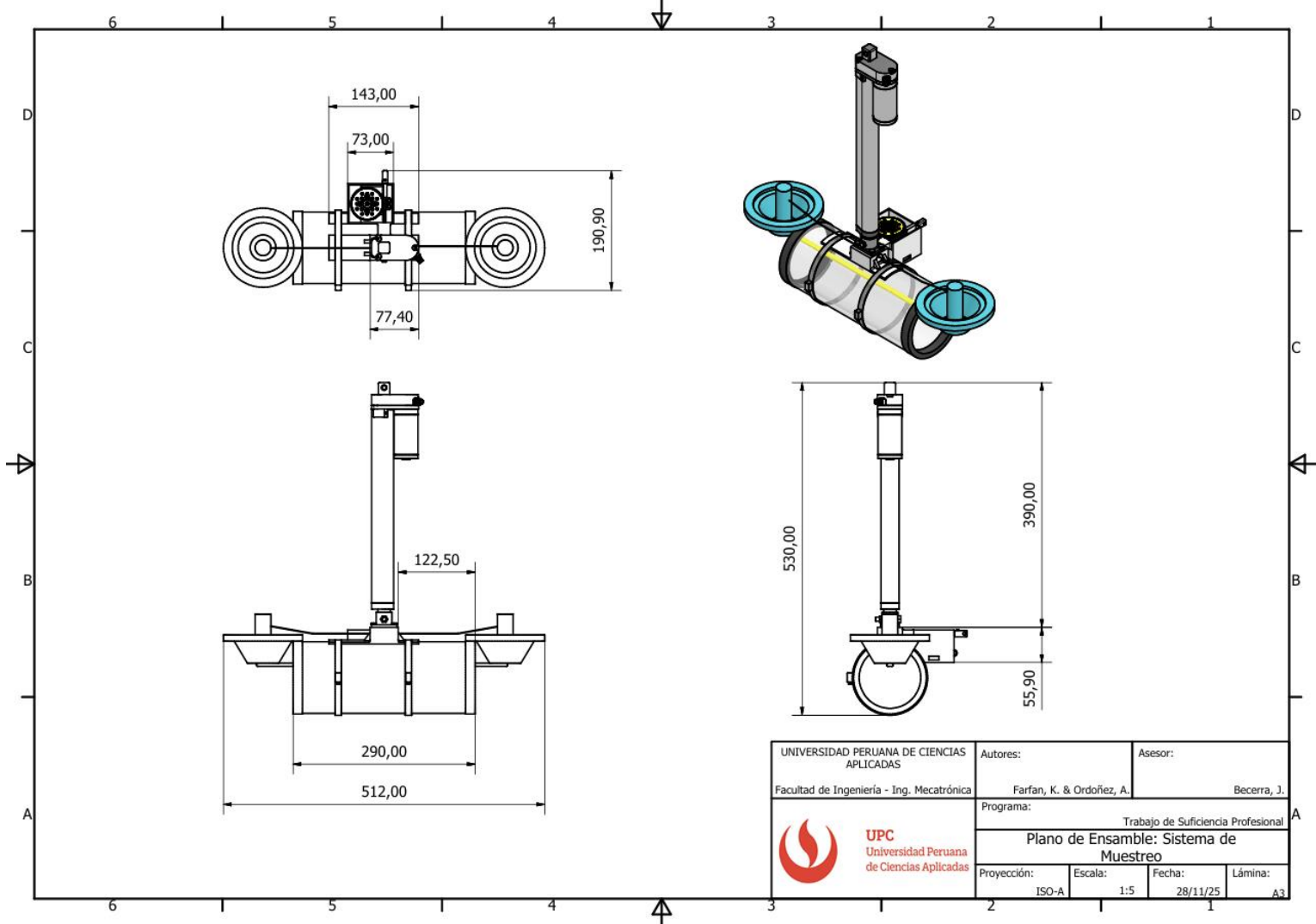
YSI Xylem. (s.f.). *EXO3s Multiparameter Sonde*. Recuperado el 28 de octubre de 2025, de <https://www.yxi.com/exo3s?srsltid=AfmBOopPunzizwqGtgbaYcghrSuPy11j0zFW2oDhAuGBpbnGvSEYasBf>

6 ANEXOS

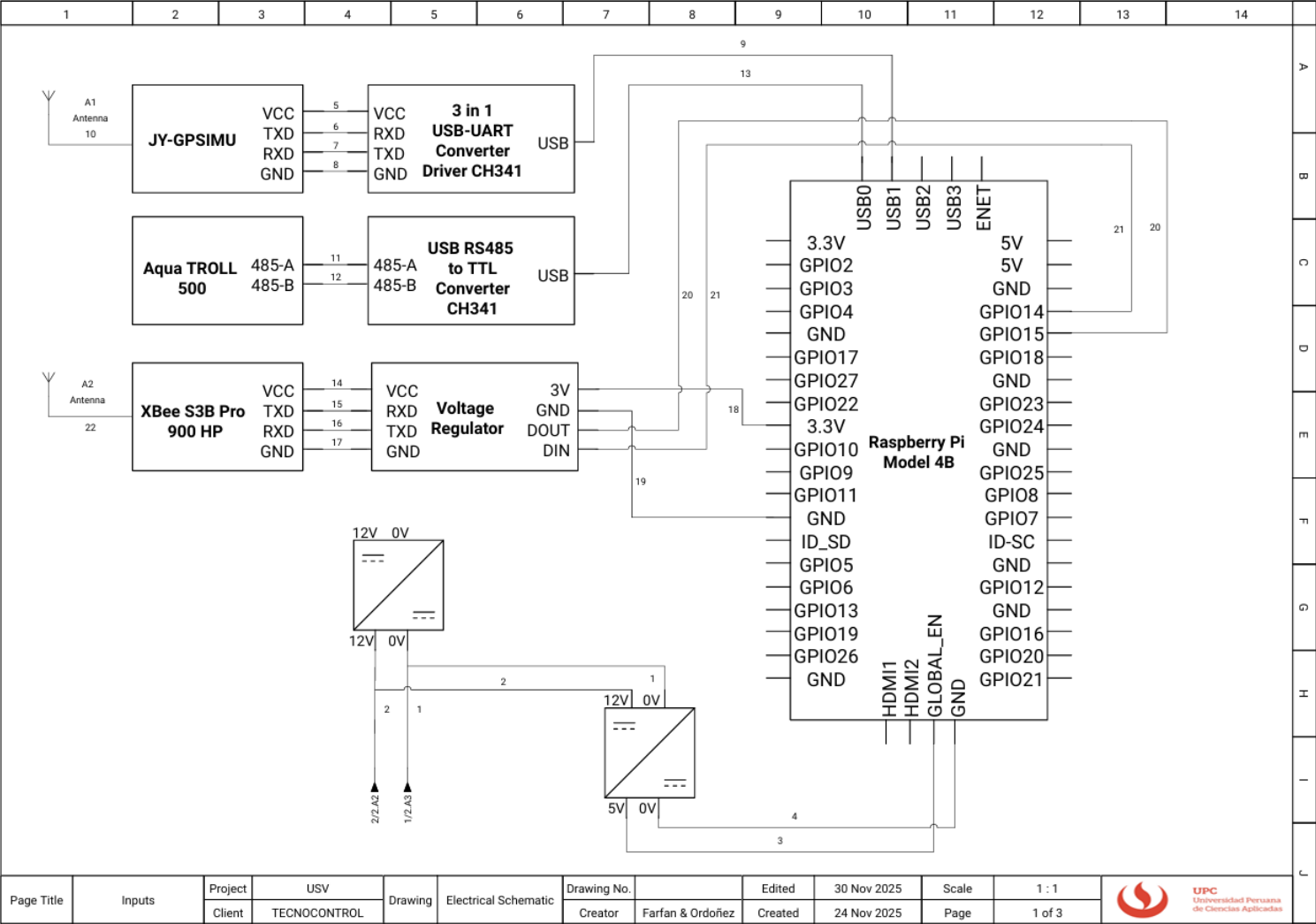
6.1 Anexo 1: Diseño mecánico del USV tipo trimarán



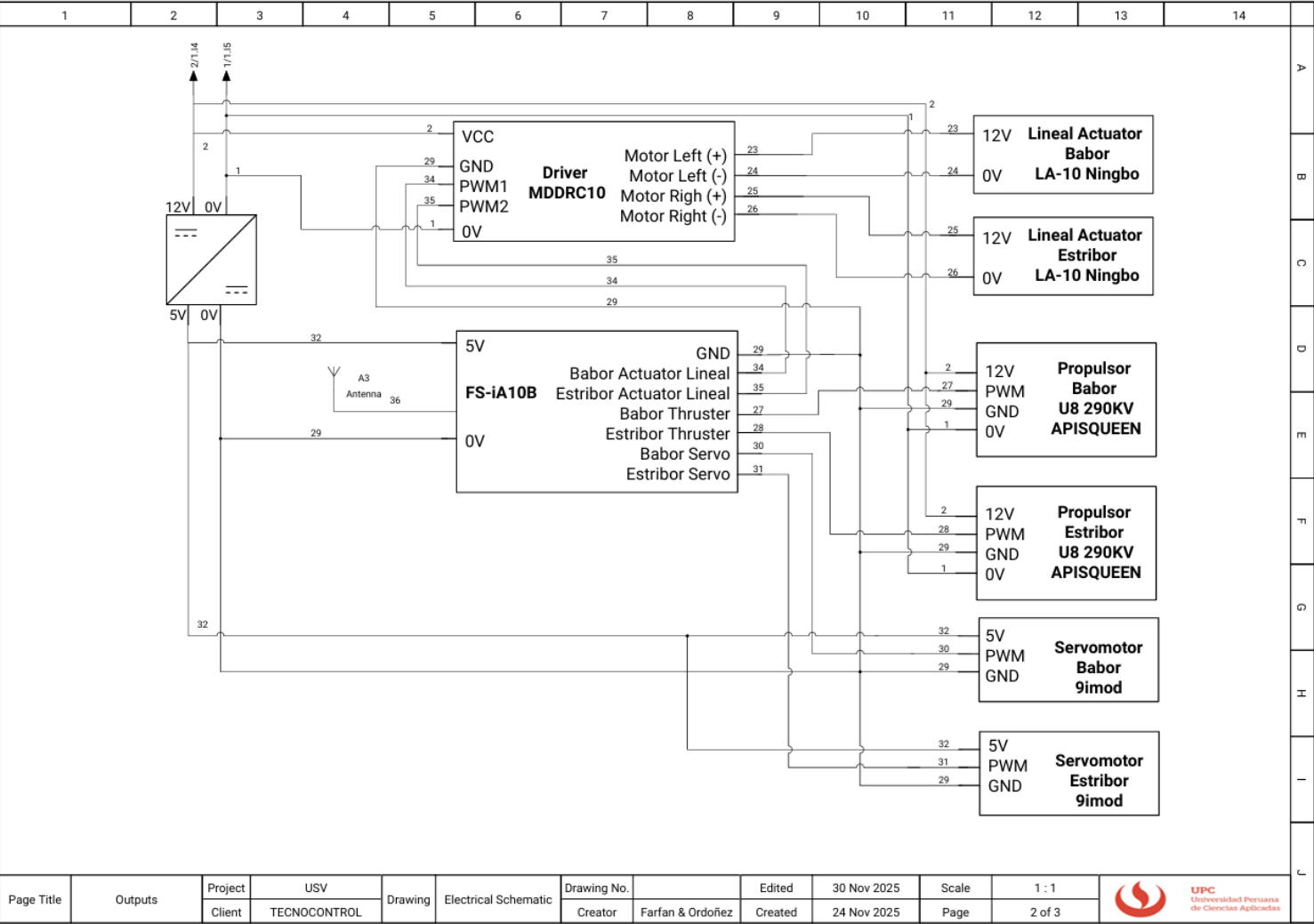
6.2 Anexo 2: Sistema de muestreo del USV



6.3 Anexo 3: Conexión de sensores y XBee a la Raspberry Pi 4B



6.4 Anexo 4: Conexionado de actuadores al receptor FS-iA10B



Page Title	Outputs	Project	USV	Drawing	Electrical Schematic	Drawing No.	Edited	30 Nov 2025	Scale	1 : 1	 UPC Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
		Client	TECNOCONTROL			Creator	Farfan & Ordoñez	Created	24 Nov 2025	Page	

6.5 Anexo 5: Conexión de la estación remota

