



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN UN PROTOTIPO DE MINI SUBMARINO EXPLORADOR

PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MEDIANTE COMUNICACIÓN RC

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero en Electrónica

AUTORES: OSMAR MARCELO ARANA VELOZ

MANUEL ANTONIO BRAVO PACHECO

TUTOR: ING. BARCIA AYALA ORLANDO, MSc

Guayaquil – Ecuador

2026

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Osmar Marcelo Arana Veloz con documento de identificación N° 0942091984 y Manuel Antonio Bravo Pacheco con documento de identificación N° 0953686854; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 02 de marzo del año 2026

Atentamente,



Osmar Marcelo Arana Veloz

0942091984



Manuel Antonio Bravo Pacheco

0953686854

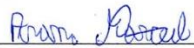
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Osmar Marcelo Arana Veloz con documento de identificación N° 0942091984 y Manuel Antonio Bravo Pacheco con documento de identificación N° 0953686854, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño e Implementación un prototipo de mini submarino explorador para la adquisición de imágenes mediante comunicación RC”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

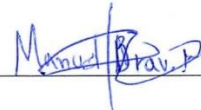
Guayaquil, 02 de marzo del año 2026.

Atentamente,



Osmar Marcelo Arana Veloz

0942091984



Manuel Antonio Bravo Pacheco

0953686854

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Orlando Barcia Ayala con documento de identificación N°1309445714, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN UN PROTOTIPO DE MINI SUBMARINO EXPLORADOR PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MEDIANTE COMUNICACIÓN RC**, realizado por Osmar Marcelo Arana Veloz con documento de identificación N° 0942091984 y Manuel Antonio Bravo Pacheco con documento de identificación N° 0953686854, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 02 de marzo del año 2026.

Atentamente,



Ing. Orlando Barcia Ayala, MSc

1309445714

DEDICATORIA

A mi padre, por ser mi guía y el ejemplo de fortaleza que sigo cada día; a mi hermano, por ser mi compañero incondicional y el mejor apoyo en cada paso; y a toda mi familia, por ser el refugio donde siempre encuentro amor y pertenencia. Gracias por creer en mí, por enseñarme el valor de la unión y por ser el motor que impulsa todos mis logros. Todo lo que soy es, en gran parte, gracias a ustedes

Osmar Marcelo Arana Veloz

Dedico este trabajo de titulación a la memoria de mi gran amigo, el que debió ser mi colega, Dylan Barreto Espinoza. Espero que este trabajo sea motivo de orgullo para él donde sea que esté.

Manuel Antonio Bravo Pacheco

AGRADECIMIENTO

A mi universidad, por haberme brindado un hogar académico y las herramientas necesarias para crecer profesional y personalmente. Mi más profundo agradecimiento a mis profesores, quienes con su paciencia, sabiduría y exigencia no solo me transmitieron conocimientos, sino que despertaron en mí la curiosidad y la pasión por mi carrera. Gracias por ser los arquitectos de mi formación y por creer en mi potencial incluso en los momentos de mayor desafío.

Osmar Marcelo Arana Veloz

A mis padres, por su apoyo y su inquebrantable confianza en mí mientras trabajaba para alcanzar este objetivo. Ellos son los principales artífices de mi educación gracias a los sacrificios que hicieron por mí. También estoy en deuda con todos mis amigos que me han apoyado y acompañado durante los momentos más difíciles de todos mis proyectos a lo largo del camino. Y muchas gracias a mi mejor amigo, Dylan, cuya presencia física no estará conmigo para celebrar este momento en mi graduación. Siempre estará en mi corazón y espero que pueda verlo desde dondequiera que esté.

Manuel Antonio Bravo Pacheco

RESUMEN

El trabajo para la obtención del título consistió en el diseño e implementado un prototipo de mini submarino explorador, para la adquisición de imágenes mediante comunicación RC, el mismo que, como indica en sus especificaciones, se controla mediante un sistema de radio control para el movimiento, además, se buscó abordar una problemática relacionada con el retraso de los tiempos de ejecución del movimiento y sin necesidad de la intervención humana en sistemas similares. Por ello, la comunicación del minisubmarino fue capaz de regular la velocidad de los propulsores, ajustándose a condiciones del entorno subacuático, evitando así fallos en los motores.

El desarrollo del sistema de control para el minisubmarino se realizó en varias etapas, incluyendo una fase de investigación bibliográfica y pruebas iniciales en entornos controlados. La configuración de los componentes electrónicos, como el ESC (Controlador Electrónico de Velocidad) para los motores, permite evaluar los comportamientos del prototipo.

En las etapas a desarrollar se abarcó: la elección de componentes, el diseño de la estructura mecánica en 3D, la comunicación por medio del radio control y la obtención de imágenes mediante un dispositivo de visualización. Esto permitió la obtención de datos detallada de cómo los sistemas de comunicación y monitoreo se integran para mejorar la exploración subacuática.

Palabras Clave: subacuática, control rc, propulsores, estructura mecánica, motores

ABSTRACT

The work required to obtain the degree consisted of designing and implementing a mini prototype, exploration submarine for acquiring images via RC communication. As indicated in its specifications, it was controlled by a radio control system for movement. In addition, the aim was to address a problem related to delays in movement execution times without the need for human intervention in similar systems. As a result, the mini-submarine's communication system was able to regulate the speed of the propellers, adjusting to underwater conditions and thus preventing engine failure.

The development of the control system for the mini-submarine was carried out in several stages, including a bibliographic research phase and initial tests in controlled environments. The configuration of the electronic components, such as the ESC (Electronic Speed Controller) for the motors, allows the behavior of the prototype to be evaluated.

The stages to be developed included: the choice of components, the design of the mechanical structure in 3D, communication via radio control, and image acquisition using a display device. This allowed detailed data to be obtained on how communication and monitoring systems are integrated to improve underwater exploration.

Keywords: Underwater, RC Control, Propulsion Systems, Mechanical Structure, Motors

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción	1
2. Problema.....	1
2.1. Antecedentes	2
2.2. Importancia y alcances.....	3
2.3. Delimitación	4
3. Objetivos	4
3.1. Objetivo general.....	4
3.2. Objetivos específicos.....	4
4. Revisión de la literatura o fundamentos teóricos	5
4.1. Robots acuáticos	5
4.2. Rov	6
4.3. Comunicación por radio control	7
4.4. Motor brushless	8
4.5. Batería li-po.....	9
4.6. Principio de arquímedes	10
4.7. Metacentro	11
4.8. Corrosión en barcos.....	12
4.9. Bambu studio	14

5.	Marco metodológico.....	15
5.1.	Simulación del submarino (matlab).....	17
5.1.1.	<i>Configuración del entorno de simulación.....</i>	<i>17</i>
5.1.2.	<i>Fases de la simulación</i>	<i>18</i>
5.2.	Diseño y manufactura del prototipo	21
5.2.1.	<i>Etapa 1.....</i>	<i>22</i>
5.2.2.	<i>Etapa 2.....</i>	<i>23</i>
5.2.3.	<i>Etapa 3.....</i>	<i>28</i>
5.3.	Integración electrónica.....	31
5.4.	Protocolo de pruebas.....	32
5.5.	Desarrollo del prototipo	35
6.	Resultados.....	40
7.	Cronograma.....	47
8.	Presupuesto.....	49
9.	Conclusiones	51
10.	Recomendaciones	52
11.	Referencias bibliográficas	54
12.	Anexos	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Vehículo acuático operado a distancia</i>	6
Figura 2	<i>Robot ROV modelo Deep Trekker DTG3</i>	7
Figura 3	<i>Radio Control – RadioLink 8 canales</i>	8
Figura 4	<i>Motores sin escobillas</i>	9
Figura 5	<i>Batería Li-Po nano-tech</i>	10
Figura 6	<i>Principio de Arquímedes</i>	11
Figura 7	<i>Metacentro</i>	13
Figura 8	<i>Corrosión en un barco</i>	13
Figura 9	<i>Bambu Studio</i>	14
Figura 10	<i>Diagrama de ruta</i>	16
Figura 11	<i>Proceso inicial de inmersión del submarino</i>	19
Figura 12	<i>Descenso del submarino</i>	19
Figura 13	<i>Ascenso del submarino</i>	20
Figura 14	<i>Recuperación del submarino</i>	21
Figura 15	<i>Piezas impresas en 3D de prueba</i>	22
Figura 16	<i>Pieza 3D diseñado de 100 mm de diámetro y 500 mm de longitud</i>	23
Figura 17	<i>Prototipo ensamblado en Etapa 2</i>	25
Figura 18	<i>Modelado de anillo</i>	26
Figura 19	<i>Diseño del sistema de flotabilidad y lastre</i>	28
Figura 20	<i>Encaje del modelado</i>	29
Figura 21	<i>Configuración de los parámetros de impresión</i>	29
Figura 22	<i>Prototipo ensamblado</i>	30
Figura 23	<i>Pruebas con los distintos componentes</i>	32
Figura 24	<i>Verificación de conexión y aislamiento</i>	33
Figura 25	<i>Pruebas de estanqueidad y trimado</i>	33
Figura 26	<i>Pruebas dinámicas en una piscina</i>	35
Figura 27	<i>Sincronización receptor</i>	37
Figura 28	<i>Segundo prototipo</i>	38
Figura 29	<i>Prototipo fallido</i>	39
Figura 30	<i>Prototipo exitoso</i>	40
Figura 31	<i>Prueba del Submarino</i>	41
Figura 32	<i>Recuperación del submarino</i>	42
Figura 33	<i>Desensamble del submarino</i>	43
Figura 34	<i>Actuador</i>	44
Figura 35	<i>Movilidad</i>	45
Figura 36	<i>Prueba</i>	46
Figura 37	<i>Imágenes</i>	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Cronograma del Trabajo de Titulación</i>	48
Tabla 2. <i>Presupuesto del Trabajo de Titulación</i>	50

1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto de titulación se presenta los pasos y componentes para el diseño e implementación un prototipo de mini submarino explorador, enfocado en la adquisición de imágenes mediante comunicación por control remoto (RC). La metodología para el desarrollo del proyecto se fundamenta en el análisis de artículos académicos y portales especializados en robótica para establecer los requerimientos técnicos necesarios. Se definió una estructura mecánica en el sistema de propulsión del minisubmarino, considerando los requerimientos de maniobrabilidad y estabilidad para la inspección subacuática, utilizando para su manufactura el sistema de impresión 3D de código abierto UltiMaker Cura. Finalmente, se verificó el funcionamiento adecuado de la programación y estructura del minisubmarino, evaluando variables como la velocidad, la profundidad, el tiempo de respuesta y el alcance de la comunicación del radio control (RC).

2. PROBLEMA

Analizando el enfoque del proyecto, las tecnologías de detección robótica submarina han atraído una atención notable en la Ingeniería Marina y la exploración de recursos. Por un lado, los robots submarinos necesitan percibir el entorno y realizar navegación autónoma y evitar obstáculos (Paredes, 2023).

Por otro lado, los robots submarinos también dependen de la capacidad tecnológica de detección para realizar diversas tareas prácticas, entre las que se puede considerar la detección de objetos, agarre robótico submarino y medición 3D submarina de alta precisión. En resumen, la

tecnología de detección robótica submarina desempeña un papel cada vez más importante en la robótica (Cong, 2021).

2.1. Antecedentes

En los últimos años ha incrementado el interés por el diseño de mini submarinos exploradores para toma de imágenes subacuáticas, principalmente basados en sistemas de radio control (RC) y coste reducido; la mayoría están orientados a aplicaciones como: la inspección de infraestructuras marinas, la monitorización ambiental y el ecoturismo, en los que es necesaria la transmisión de vídeo en tiempo real a través de enlaces inalámbricos y por cable (Alcaraz, et al., 2022).

Varios estudios han demostrado cómo sería la aplicación técnica de sistemas de control remoto a vehículos submarinos en radiofrecuencias, cuya evolución se asemeja a los protocolos utilizados en los vehículos pilotados a distancia, y cómo gestionar tanto la profundidad como la orientación del vehículo submarino por medio de los modos manual o semiautomático (Barrales Romero, 2022); donde se ha podido reconocer que durante los avances continuos en la robótica, resalta la creciente importancia del desarrollo de sistemas autónomos para la exploración y operación en entornos desafiantes como el subacuático (Cepeda & Sang, 2023).

Adicionalmente, los más recientes proyectos del área de Ingeniería Electrónica y Mecatrónica se han enfocado a la exploración marítima (Carrasco Alcaraz, 2022), por lo que muchos centros educativos y universidades han comenzado a desarrollar robots submarinos no tripulados y tripulados manualmente, sin embargo, aún hay pocos trabajos de titulación relacionados a robótica acuática o similares, tal es el caso del trabajo de titulación de (Paredes,

2023), donde se puede utilizar ciertas teorías de control para desarrollar y crear dispositivos subacuáticos; que incentiven a los estudiantes a explorar más el mundo marítimo.

2.2. Importancia y alcances

En muchas ocasiones los altos costos de adquisición de prototipos para búsqueda subacuática, restringen mucho la capacidad de los estudiantes de poder implementar el área teórica en la práctica; por esta razón, se implantó este prototipo en los laboratorios y cursos de la institución, donde favorece el proceso de enseñanza y aprendizaje, permitiendo a los estudiantes abarcar de manera práctica, principios básicos de física, electrónica y programación.

Esto despierta el interés por las carreras STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, contribuyendo a la formación de una sociedad más preparada y adaptable a los retos tecnológicos del futuro.

Se conoce que actualmente en la Universidad Politécnica Salesiana, existe poco conocimiento de la tecnología de sumergibles, a diferencia de los países más desarrollados donde ya está siendo utilizada, y ofrece grandes beneficios. Esta iniciativa es impulsar el crecimiento de las aplicaciones con diferentes tecnologías, como wifi, infrarrojo, bluetooth, etc.

La finalidad de este proyecto es presentar una idea alternativa a los estudiantes dentro del entorno, un prototipo de robot sumergible que sea transportable, el cual, además de guiarse de manera autónoma o remota, también permite adquirir ciertos datos del exterior y el medio donde se desempeña.

2.3. Delimitación

El tiempo estimado para el diseño, simulación y pruebas de funcionamiento del prototipo abarcó todo el periodo P67; el mismo que se llevó a cabo en la Universidad Politécnica Salesiana, ubicado en Guayaquil, Ecuador. Las pruebas iniciales del prototipo fueron realizadas en pequeños estanques y posteriormente se implementó en la piscina de la institución para pruebas en condiciones reales y controladas.

El proyecto contempla el estudio de las materias de electrónica analógica, electrónica digital, procesamiento digital de señales, redes de computadoras y física general.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- Diseñar e Implementar un prototipo de mini submarino explorador para la adquisición de imágenes mediante comunicación RC.

3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar la estructura mecánica y de propulsión del minisubmarino, considerando los requerimientos de maniobrabilidad y estabilidad para la inspección subacuática
- Implementar adquisición, procesamiento de imágenes y video.
- Integrar un control remoto que permite la navegación y operación del minisubmarino.
- Validar el robot minisubmarino en entorno controlado.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El diseño y construcción de vehículos submarinos no tripulados a pequeña escala, como menciona (Kumar, 2024), son vehículos operados remotamente o ROV, por sus siglas en inglés y los vehículos submarinos autónomos o AUV's por sus siglas en inglés, se fundamentan en la integración de la mecánica de fluidos, la manufactura aditiva y los sistemas de control electrónico (Salgado, 2016).

Según Salgado (2016), estableciendo la viabilidad de fabricar sumergibles mediante impresión 3D para reducir los altos costos de los modelos comerciales. Su investigación demuestra que es posible implementar sistemas de control automático en vehículos de bajo coste para corregir la inestabilidad natural de los sumergibles, especialmente en el eje transversal (cabeceo), utilizando microcontroladores y entornos de simulación.

4.1. Robots acuáticos

Según Becher (2024), los robots acuáticos son prototipos creados para operar en entornos marinos sin la necesidad de ser operados por mano humana. Usualmente, se utilizan para la exploración marítima, la preservación de infraestructura marítima, la vigilancia ambiental y la fotografía oceánica. Estos robots cuentan con sensores, cámaras y actuadores en forma de brazo para realizar tareas mientras se encuentran bajo del agua, como se puede observar en la **Figura 1**. (Iñigo & Vidal, 2022)

Figura 1

Vehículo acuático operado a distancia



Nota. Robot acuático tipo submarino utilizado para la recolección de información y estudios marinos. Adaptado de *Robótica Subacuática: Cómo Funciona y Ejemplos*, por B. Becher, 2024.

4.2. ROV

Según se menciona en las investigaciones de DeepTecker (2023), los ROV poseen un tamaño a considerar, ya que pueden ser tan reducidos como un balón o tener gran magnitud como el tamaño de una camioneta, esto hace que los precios de estos equipos cambien de manera significativa, los ROV se utilizan en varias industrias, entre las principales se tiene la exploración, el uso militar, acuicultura, biología marina o uso recreativo. Estos dispositivos facilitan la grabación de imágenes y videos para la inspección de muelles y embarcaciones; a su vez, también se usan para localizar objetivos bajo el agua a alta profundidad.

Un ROV es un vehículo operado a distancia, como se observa en la **Figura 2**, los ROV son equipos submarinos altamente maniobrables que se utilizan para la exploración marítima. (Noaa, 2024)

Figura 2

Robot ROV modelo Deep Trekker DTG3



Nota. Este tipo de robot es utilizado para trabajo de reconocimiento y expedición marítima.

Tomada de *¿Qué son los ROV submarinos y para qué se utilizan?*, por B. DeepTecker, 2023.

4.3. Comunicación por Radio Control

La tecnología de radio control es la capacidad de maniobrar un dispositivo a distancia, comúnmente se utiliza una red inalámbrica mediante el uso de una emisora de control remoto, en el ámbito del radio control se utilizan tres técnicas: la electrónica que se utiliza para transformar los comandos de ondas de radio en el transmisor y de forma inversa al receptor, la electricidad, que se utiliza para administrar la energía y la mecánica que se encarga de mover distintos actuadores, según sea la aplicación; en **Figura 3**, se visualiza un modelo de radio utilizado comúnmente en la actualidad. (Katsoulis, 2017)

Figura 3

Radio Control – RadioLink 8 canales



Nota. Dispositivo de radio control utilizado para el control de un dron aéreo. Tomado de *Control Remoto RC*, por E. Katsoulis, 2017.

4.4.Motor Brushless

El Motor Brushless, es un tipo de motor sin escobillas que está en constante innovación, DeepTecker (2023), menciona que actualmente se pueden encontrar motores con una certificación de impermeabilidad, que ayuda a ser sumergido, algo que resulta ideal para la realización de este proyecto; como se mencionaba emplea imanes permanentes en lugar de escobillas para crear un campo magnético que gira el rotor. Esto que no hay contacto físico entre las escobillas y el rotor, lo que reduce el desgaste y aumenta la eficiencia energética, un modelo se visualiza en la **Figura 4**.

4.5. Batería Li-Po

Según Cobelas (2025), es una batería recargable de iones de litio que utiliza electrolito polimérico (gel o sólido) en vez de un líquido. Se caracteriza por su alta densidad energética, bajo peso y capacidad de moldearse en diversas formas, hace ideal para dispositivos portátiles y de alto rendimiento que operan con una tensión nominal de 3.7V por celda, alcanzando 4.2V a plena carga, en la **Figura 5**, se observa un modelo de batería Li-Po de 2 celdas.

Figura 4

Motores sin escobillas



Nota. Modelo de motor Brushless comercial. Tomado de *Modos de funcionamiento del motor de CC sin escobillas con un inversor de 120 grados*, por S. Sudhoff & P. Krause, 2022, IEEE Transactions on Energy Conversion (558-564).

Figura 5

Batería Li-Po nano-tech



Nota. Batería recargable de iones de litio. Tomado de *Batería Li-Po*, E. Cobela, 2024, AVelectronics.

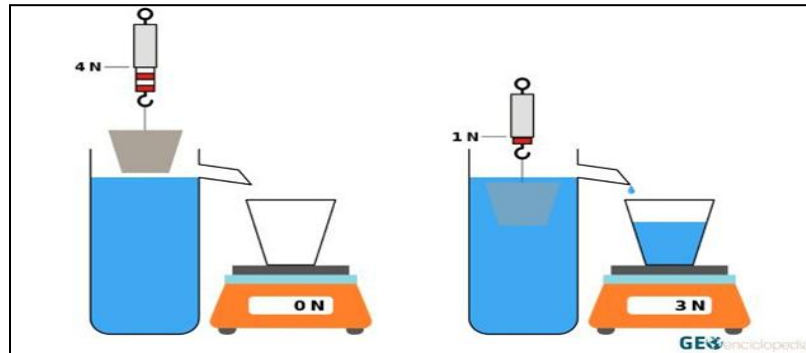
4.6.Principio de Arquímedes

Según Hagler (2019), la mecánica de fluidos se basa en el principio de Arquímedes, este principio permite a los ingenieros desarrollar barcos que puedan navegar en mar abierto tomando en cuenta el movimiento de las olas, lo que les permite moverse eficientemente y a gran velocidad, incluso en olas turbulentas. El principio de Arquímedes es también la razón del porque los submarinos pueden subir y bajar del agua.

Adicionalmente, es importante conocer qué tanto Hagler (2019), como Pinto & Sánchez (2025), coinciden en que un submarino posee tanques inundables que permiten aumentar de masa debido a que los tanques absorben el agua. Esto hace que el submarino se haga más pesado y por ende aumente su densidad y tenga una densidad mayor a la del agua, en la **Figura 6**, se puede observar cómo funciona este principio.

Figura 6

Principio de Arquímedes



Nota. Figura que demuestra cómo funciona el principio de Arquímedes. Tomado de *Principio de Arquímedes: qué es y para qué sirve*, por V. Munilla, 2023.

4.7. Metacentro

El metacentro como se muestra en la **Figura 7**, es un término relevante dentro de la mecánica de fluidos, y del estudio de la estabilidad de cuerpos que flotan, como barcos o botes. Como se puede observar en la parte superior: G, M, B son el centro de gravedad, el metacentro y el centro de flotación separados. El metacentro está relacionado con el punto donde se supone que actúa la fuerza de la flotación, que actúa hacia arriba verticalmente a través del centro de flotación de un objeto parcialmente sumergido, cuando el objeto da la vuelta o se gira de su orientación vertical (Shen, 2024).

Según Shen (2024), como el cuerpo flotante se inclina respecto de él, ese es el centro exacto sobre el que se estructura el barco. A pesar de ser el centro de flotación, la posición del metacentro depende de la forma de la línea de flotación, de la flotabilidad que tiene lugar y que cambia cuando el barco se inclina/sea inclinado; la posición del metacentro va cambiando de forma dinámica.

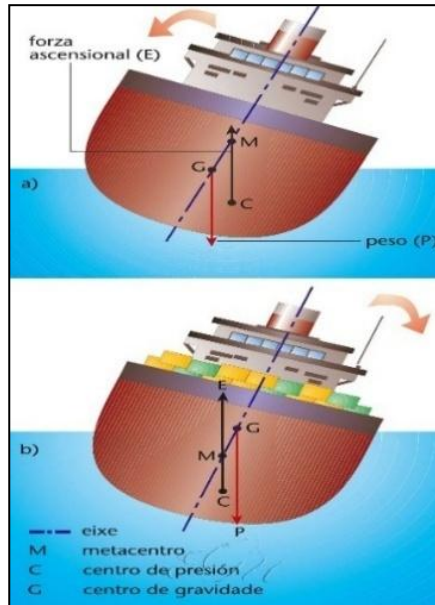
4.8. Corrosión en barcos

En la **Figura 8**, se muestra la corrosión presente en los buques, es un desafío habitual que se debe a la exposición de diferentes componentes metálicos al entorno marino. Es un proceso electroquímico natural que va deteriorando la integridad y el rendimiento de las estructuras y los equipos del barco con el paso del tiempo. Entre los agentes corrosivos del entorno marino se cuentan el agua de mar, la humedad, la niebla salina, los productos químicos y los organismos microbiológicos.

Según Hagler (2019), la corrosión puede llegar a afectar a diferentes partes de un buque, como el casco del buque, los tanques de lastre, las tuberías, las hélices, los timones y determinados accesorios metálicos, con el consiguiente debilitamiento de los componentes estructurales y de la eficacia operativa, y con el aumento de costes de mantenimiento e incluso de riesgos en seguridad.

Figura 7

Metacentro



Nota. Principio físico necesario para el equilibrio de un barco o submarino. Tomado de *Enciclop Galega Universal*, por X. De Galicia, 2025, EGU

Figura 8

Corrosión en un barco



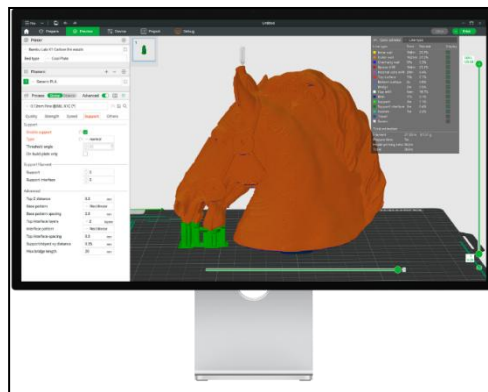
Nota. Barco afectado por la corrosión debido al paso del tiempo. Tomado de *Enciclop Galega Universal*, por X. De Galicia, 2025, EGU.

4.9. Bambu studio

Bambu Studio es un programa de laminado (slicer) de código abierto que resulta esencial para la impresión 3D, pues se trata de un software que convierte modelos digitales en código G para que las impresoras 3D puedan interpretar e imprimir como se ve en la figura 8. Este programa ha sido creado, desarrollado y puesto en marcha por BambuLab y su principal característica es que cuenta con una interfaz intuitiva, con una amplia compatibilidad con una gran variedad de impresoras, con perfiles de impresión optimizados y con muchas posibilidades de personalización, manteniendo las actualizaciones constantes para seguir avanzando en sus prestaciones. Por lo tanto, su gran uso habitual y su uso como software de código abierto lo han situado como un estándar para la impresión 3D, por lo que sus usuarios ya tienen muy interiorizado el proceso de implementación para la creación de objetos físicos de forma precisa. (BambuLab, 2026)

Figura 9

Bambu Studio



Nota. Software de impresión 3D utilizado en varios ámbitos de diseño y modelado. Tomado de *Bambu Lab, 2026, Bambulab.*

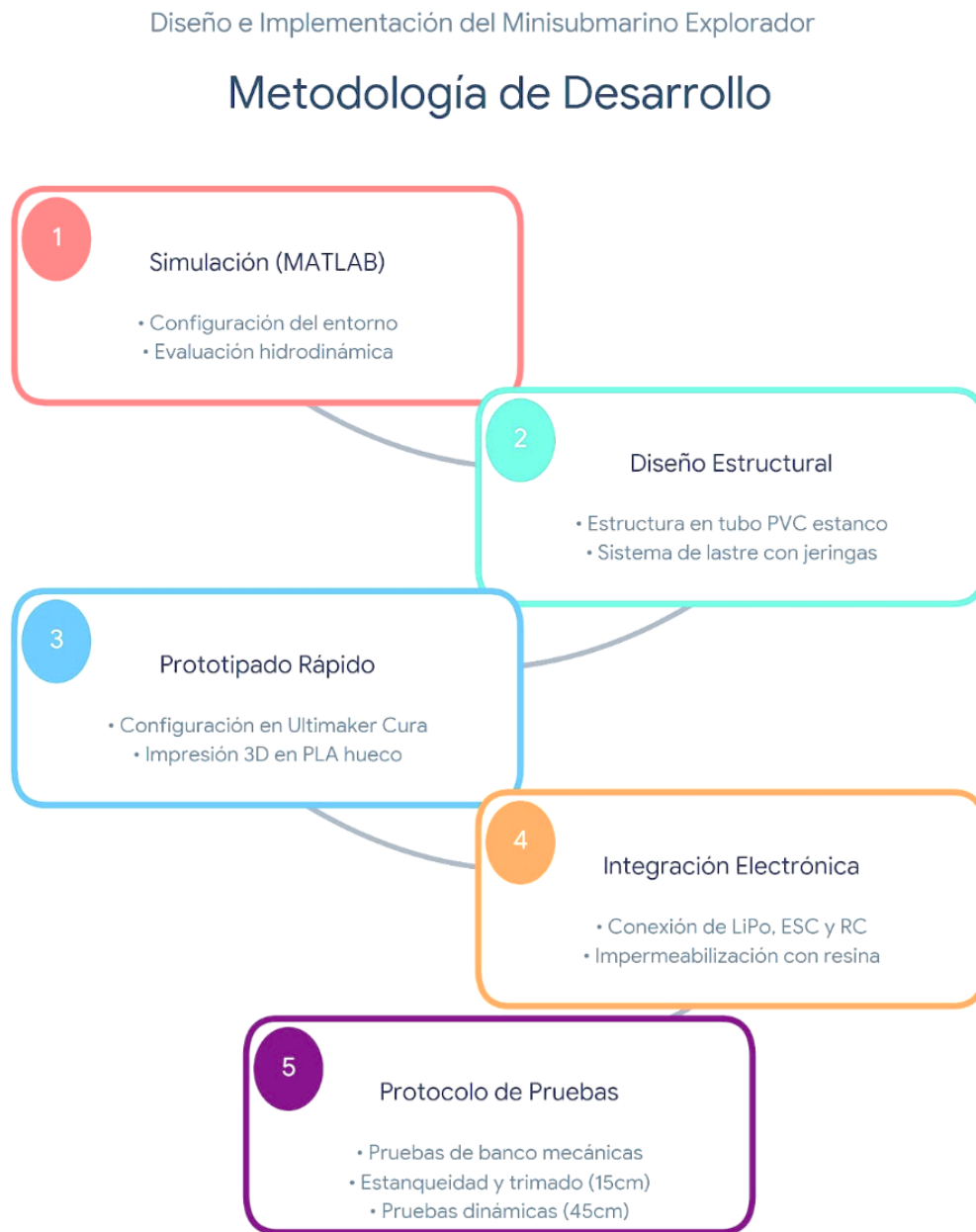
5. MARCO METODOLÓGICO

En este apartado se pretende indicar de manera simplificada, el desarrollo e implementación un prototipo que permitió realizar la exploración acuática submarina mediante un sistema de radio control (RC). El sistema utiliza tecnología de control de movimiento a distancia, así como sensores que facilitaron la navegación en entornos controlados. Para el desarrollo del sistema de exploración submarina, se empleó un enfoque que combina los métodos inductivo, experimental, bibliográfico y documental, cuya secuencia lógica se detalla en la **Figura 10**.

El enfoque inductivo permite la aplicación de conocimientos previos en el área de robótica y todo lo que esto conlleva, diseño, control y navegación; desde la perspectiva experimental, se llevaron a cabo ensayos iniciales en ambientes controlados, mediante el uso de piscinas y tanques de pruebas, con propósito de evaluar el funcionamiento del prototipo bajo condiciones controladas de visibilidad y maniobrabilidad. Asimismo, mediante la metodología bibliográfica documental, se garantizó la integración eficiente de todos los componentes del sistema, incluyendo sensores, motores, transmisor RC, carcasa sumergible, asegurando que el dispositivo responda adecuadamente a las condiciones del entorno de prueba. Además de una cámara para la adquisición y procesamiento de imágenes y video en tiempo real.

Figura 10

Diagrama de ruta



Nota. Control del proceso mediante una ruta previamente definida.

5.1. Simulación del submarino (MATLAB)

Con el propósito de evaluar el comportamiento hidrodinámico, se implementó en MATLAB un modelo matemático basado en la segunda Ley de Newton, donde la sumatoria de fuerzas determina la aceleración del sistema. Esto permitió validar teóricamente la estabilidad del control de profundidad antes de la fase experimental integrando el Principio de Arquímedes para calcular el empuje hidrostático frente al peso variable del submarino y la fuerza de arrastre hidrodinámico.

Para la gestión de la profundidad, se diseñó un algoritmo de control lógico que reguló el ingreso y expulsión del agua en los tanques, modificando directamente la masa total del sistema sin alterar el volumen. Además de variar la densidad del submarino, alternar entre los tres diferentes estados operativos (Inmersión, mantenimiento y emersión). Y verificar que el modelo matemático responde correctamente ante estas magnitudes de masa, volumen y presión, asegurando el principio de Arquímedes, las ecuaciones de movimiento y la lógica del sistema de lastre consistentes antes de su adaptación a un prototipo de escala.

5.1.1. Configuración del entorno de simulación

Para evaluar el comportamiento matemático del prototipo, se configuró los parámetros del submarino, la lógica de control y las ecuaciones físicas en un entorno controlado; los parámetros usados para la simulación del prototipo a escala fueron los siguientes:

- **Entorno:** Densidad del agua ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) y gravedad estándar ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), representativas de un entorno de pruebas controlado.

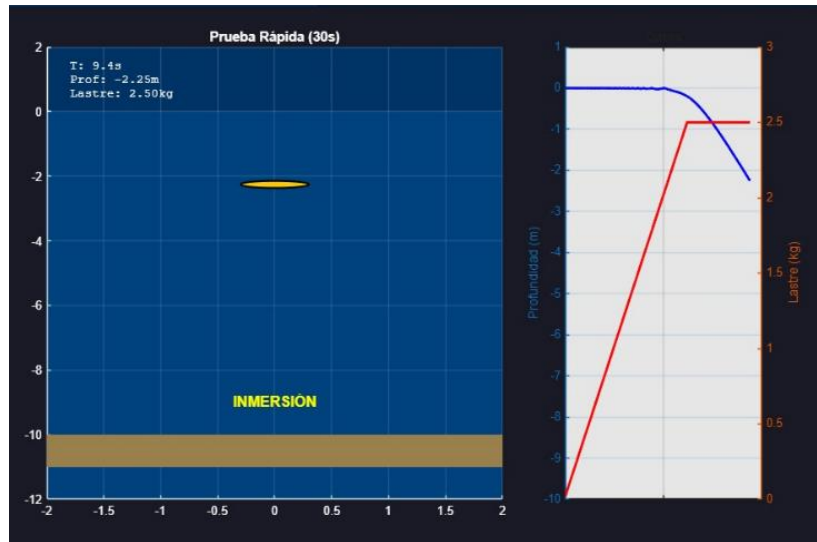
- **Cuerpo del vehículo:** Masa en seco comprendida entre 2 y 4 kg, correspondiente a la estructura, electrónica y sistemas internos, y un volumen total aproximado de 5.7×10^{-3} m³, obtenido a partir de la geometría del prototipo.
- **Sistema de lastre:** Capacidad máxima del tanque de aproximadamente 3.5 kg de agua, con tasas de llenado y vaciado ajustadas a valores realistas para un prototipo experimental a escala.
- **Límites operativos:** Profundidad máxima de -10 metros, adecuada para evaluar el comportamiento dinámico del sistema durante ciclos de inmersión y emersión en piscinas o tanques de ensayo.

5.1.2. Fases de la simulación

- **Fase de inmersión:** En el gráfico de la **Figura 11**, se muestra un rápido aumento de la línea roja, que representa el peso total del submarino. Cuando el tanque de lastre ha alcanzado su nivel máximo de agua o su capacidad de llenado, se produce un aumento en el peso total del submarino. Por lo tanto, a medida que el peso total del submarino aumenta por encima del agua circundante, este comienza a hundirse y la línea azul del gráfico se curvará hacia abajo para mostrar la profundidad del submarino que como se muestra en la imagen son 2,25 metros.
- **Fase de descenso:** Como se muestra en la **Figura 12**, la fase de llenado ha finalizado. La parte horizontal y plana de la línea roja en el gráfico de la derecha significa que el tanque se ha llenado con el peso máximo, lo que significa que todas las válvulas están cerradas y que ya no se está añadiendo más agua. El submarino desciende de forma constante como se muestra en la línea azul descendente hacia la profundidad máxima.

Figura 11

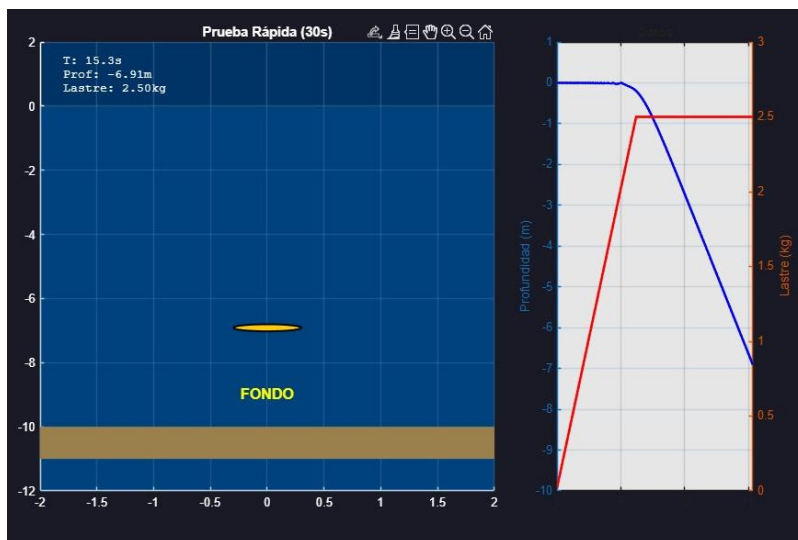
Proceso inicial de inmersión del submarino



Nota. Inicio de inmersión del submarino.

Figura 12

Descenso del submarino

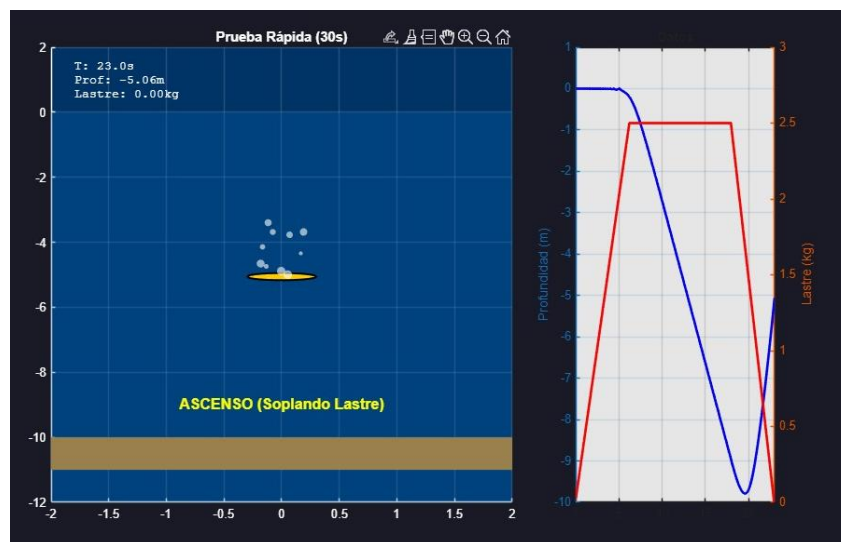


Nota. Se observa al submarino llegar al fondo límite establecido en la simulación.

- Fase de ascenso:** En la **Figura 13**, se observa la fase de ascenso donde se muestra la descarga de lastre y aparece resaltado a la derecha del gráfico; cuando la línea roja desciende rápidamente hasta cero kilogramos, muestra el rápido proceso de vaciado del tanque. La reducción del exceso de peso da lugar a una aceleración ascendente del vehículo correspondiente al resultado que supera el peso del vehículo en ese momento. La línea azul muestra un aumento de ocho veces en la altitud (5,06 metros por debajo del nivel del mar) hasta la superficie del agua, con el gráfico de la línea azul también subiendo.

Figura 13

Ascenso del submarino



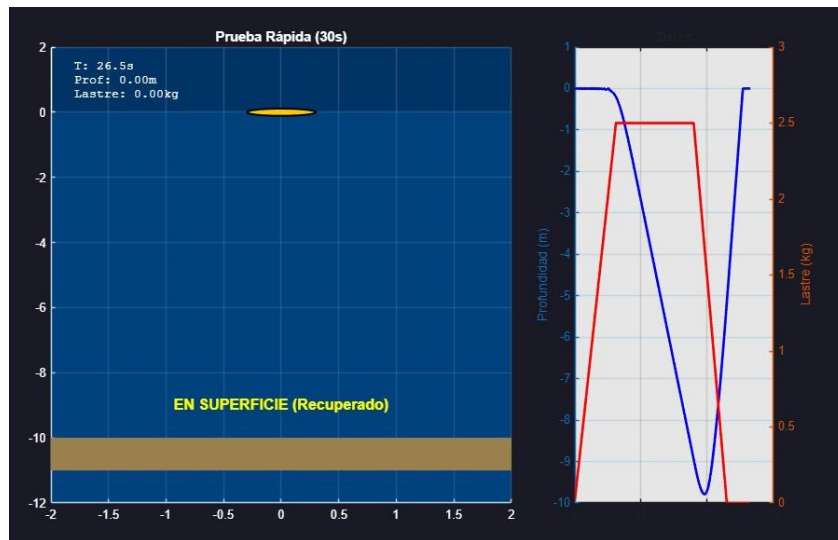
Nota. El recorrido del submarino empieza a ascender.

- Fase de recuperación:** En la **Figura 14**, se visualiza la fase de recuperación ha concluido con éxito, ya que el submarino ha cumplido su objetivo, es decir, volver a la superficie. Es importante mencionar que en el gráfico de datos se muestra en la línea roja que el submarino tiene un peso adicional de 0kg, lo que indica que el software de control fue

capaz de reconocer que el sumergible había alcanzado la superficie y cerró automáticamente las válvulas de aire para que no se escapara. Al no tener ningún peso añadido y flotar a una velocidad cero, el prototipo pudo permanecer en la posición normal sin problemas.

Figura 14

Recuperación del submarino



Nota. Proceso de inmersión y recuperación concluida con éxito.

5.2. Diseño y manufactura del prototipo

Durante el desarrollo del prototipo se tuvieron algunas variantes, por lo que se ha definido clasificarlo en 3 etapas, las mismas fueron desarrolladas y explicadas a continuación:

5.2.1. Etapa 1

La etapa inicial del diseño del submarino de control remoto (RC) consistió en la definición de los requisitos funcionales del prototipo. Estos requisitos fundamentales incluyeron: garantizar la estabilidad hidrodinámica, poseer una robustez estructural suficiente para soportar ciclos iterativos de pruebas y reajustes, e integrar una protección eficaz para los componentes internos contra la ingesión de agua. En la **Figura 15**, se puede observar un conjunto de piezas impresas para realizar las primeras pruebas.

Figura 15

Piezas impresas en 3D de prueba



Nota. Piezas 3D impresas como primera opción de ensamblaje.

En base a estos criterios, se adoptó una estrategia de diseño modular. Esta solución conceptual se materializó en la concepción de un vehículo subacuático estructurado en secciones independientes, permitiendo su ensamblaje y desensamblaje según las necesidades operativas y de mantenimiento.

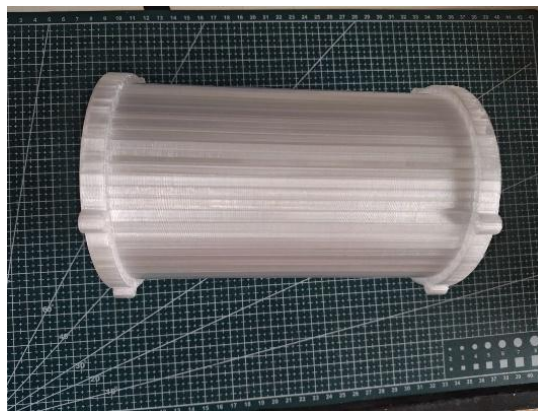
El proceso requirió de ajustes iterativos de forma periódica. Dichas modificaciones comprendían la reubicación de componentes internos, la optimización de los sistemas de estanqueidad y el reemplazo de piezas específicas. De haberse optado por una estructura monocasco o permanentemente sellada, cada una de estas intervenciones habría implicado la destrucción o la reconstrucción de segmentos completos del prototipo. En consecuencia, la selección de una configuración desmontable y remontable se justificó como la solución óptima, al facilitar significativamente la iteración y el refinamiento durante la fase de desarrollo experimental.

5.2.2. Etapa 2

Para la estructura primaria del submarino, se diseñó una pieza 3D similar a un tubo de 100 mm de diámetro y 500 mm de longitud como se ve en la **Figura 16**. Este criterio de selección se basó en su disponibilidad comercial, bajo coste y adecuación al proyecto.

Figura 16

Pieza 3D diseñado de 100 mm de diámetro y 500 mm de longitud



Nota. Pieza diseñada para sellar herméticamente la estructura y facilitar el ingreso de los componentes.

La geometría cilíndrica de este elemento estructural presenta dos ventajas fundamentales para la aplicación. Primero, permite una disposición eficiente y protegida de todos los sistemas internos (baterías, controladora, cableado y sistema de propulsión) dentro de un volumen hermético. Segundo, facilita un sistema de cierre en los extremos mediante tapas roscadas o selladas con juntas tóricas, permitiendo un acceso rápido y no destructivo para mantenimiento, ajuste o sustitución de componentes durante la etapa de pruebas.

Como se observa en la **Figura 17**, un cilindro presenta una resistencia hidrodinámica significativamente menor que un prisma de aristas vivas, lo que se traduce en una mayor eficiencia de propulsión y estabilidad en el avance bajo el agua. Desde el punto de vista estructural, un perfil circular distribuye de manera uniforme la presión hidrostática cuando el vehículo se sumerge, evitando puntos de concentración de tensión que son inherentes a las esquinas de un perfil cuadrado. Esta distribución uniforme de cargas minimiza la deformación y el riesgo de fallo estructural o de los sellos, garantizando así la integridad del compartimento estanco a profundidades operativas. Paralelamente, en esta fase se establecieron tres principios fundamentales para la estrategia de ensamblaje y estanqueidad:

- **Accesibilidad y Montaje Práctico:** La configuración interna debía permitir la instalación y el acceso a todos los componentes sin requerir la aplicación de fuerzas o herramientas especializadas excesivas, priorizando la ergonomía durante el proceso de construcción y las intervenciones posteriores.

- **Mantenibilidad Facilitada:** La fijación de todos los subsistemas y componentes se realizaría predominantemente mediante uniones atornilladas. Esta decisión de diseño garantizó desmontar el submarino por completo, facilitando de manera crítica las operaciones de mantenimiento, reparación o actualización de elementos específicos sin comprometer la integridad de la estructura.
- **Estanqueidad Garantizada:** Todas las interfaces y juntas críticas, especialmente en las tapas de acceso y pasamuros eléctricos, se fabricarían o sellarían con materiales elastoméricos. Este criterio es esencial para asegurar un sello hermético que prevenga de forma fiable la filtración de agua hacia los compartimentos internos que albergan la electrónica, asegurando la operacionalidad del prototipo en el agua.

Figura 17

Prototipo ensamblado en Etapa 2



Nota. Ensamblaje general del prototipo.

Mediante la implementación de este anillo patrón, se estableció una base de referencia dimensional fiable y consistente. Este datum físico permitió el desarrollo y la verificación de todos los subsistemas y ensamblajes secundarios, asegurando su correcta interoperabilidad y cumplimiento de las tolerancias de diseño desde las etapas iniciales del proceso de fabricación.

En la **Figura 18**, se presenta el anillo, cuya función principal es servir como sello hermético primario (estanco) para prevenir la filtración de agua hacia el interior del habitáculo. Este componente, fabricado en un material elastomérico compatible (ej. caucho nitrílico o silicona), se interpone entre las tapas laterales y el extremo del tubo principal. Su diseño garantiza una compresión uniforme al ser sometido al apriete mecánico de las tapas, deformándose de manera controlada para rellenar y sellar cualquier micro-irregularidad en las superficies de contacto.

Figura 18

Modelado de anillo



Nota. El anillo de goma tiene la función de ejercer como sello principal para evitar que se filtre el agua.

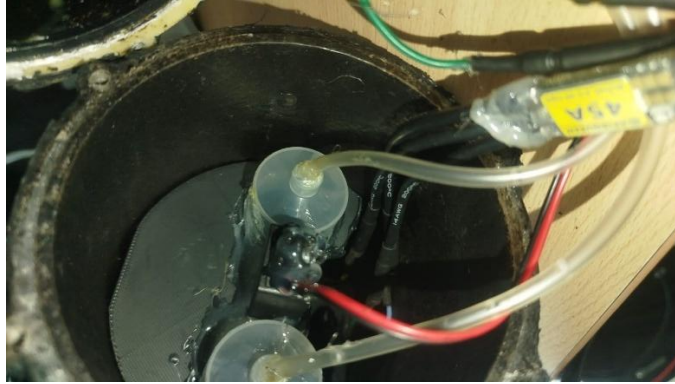
Adicionalmente, el sistema de sellado se ve reforzado por un efecto de presión asistida. A medida que el submarino desciende, la presión hidrostática externa aumenta, ejerciendo una fuerza adicional sobre las tapas laterales. Esta fuerza incrementa la compresión axial sobre el anillo sellador, mejorando progresivamente su eficacia hermética en función de la profundidad. Por lo tanto, el anillo actúa como el elemento sellador esencial, cuyo rendimiento es optimizado por la presión ambiental, conformando un sistema de estanqueidad pasivo y reforzado.

El sistema de control de flotabilidad y lastre se implementó mediante un diseño de tanques de lastre de volumen variable. La **Figura 19**, muestra la solución adoptada consiste en dos jeringas médicas de 60 ml, que actúan como cilindros de desplazamiento de agua, acopladas a un único actuador lineal tipo tornillo de potencia. Este actuador, controlado por la unidad electrónica central, acciona simultáneamente los émbolos de ambas jeringas a través de un mecanismo de acoplamiento rígido.

Al retraer los émbolos, se aspira agua marina hacia el interior de los cilindros, incrementando el peso total del vehículo y provocando su descenso. De manera inversa, al extender los émbolos, se expulsa el agua almacenada, disminuyendo la masa y facilitando el ascenso. Este sistema simétrico y de actuación centralizada permite un control preciso, estable y energéticamente eficiente de la profundidad, al tiempo que su simplicidad mecánica favorece la fiabilidad y reduce el espacio ocupado.

Figura 19

Diseño del sistema de flotabilidad y lastre



Nota. El mecanismo permite controlar el ascenso y el descenso del prototipo succionando y expulsando el agua.

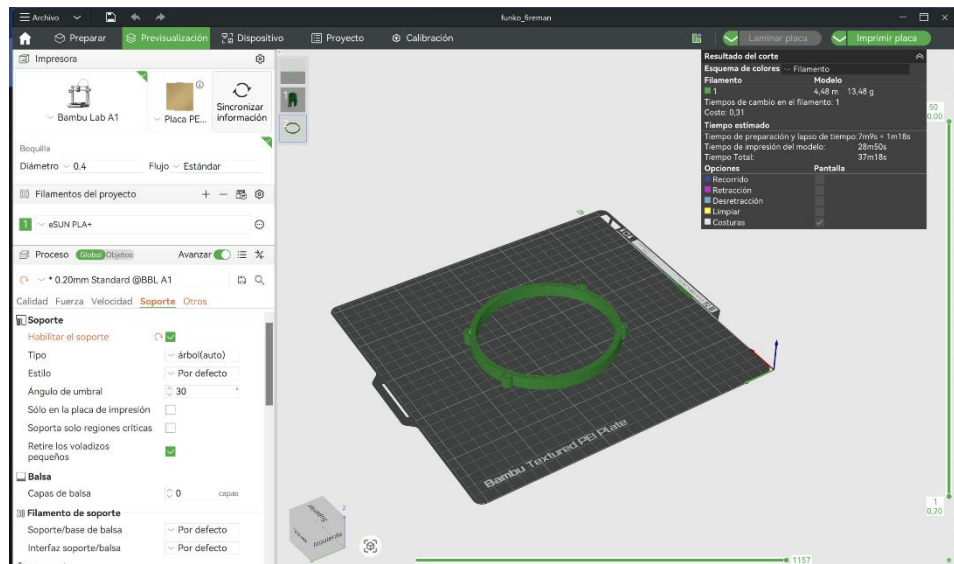
5.2.3. Etapa 3

Una vez finalizado el modelado, se exportó el archivo al software de impresión 3D donde se ajustaron las dimensiones del modelo como se detalla en la **Figura 20**, para que este encaje correctamente en la superficie de la impresora. En este caso se utilizó una impresora 3D marca Bambu Lab A1 Mini.

Posteriormente el modelo fue dividido en dos partes con el objetivo de facilitar la ubicación de los componentes internos de la estructura. Esto se logró mediante las configuraciones de los parámetros del editor de impresión como se detalla en la **Figura 21**, ajustando el porcentaje de relleno al valor de cero, permitiendo que el submarino permanezca hueco en su interior. Además, se añadieron soportes de impresión con el fin de evitar deformaciones o daños estructurales durante el proceso de manufactura.

Figura 20

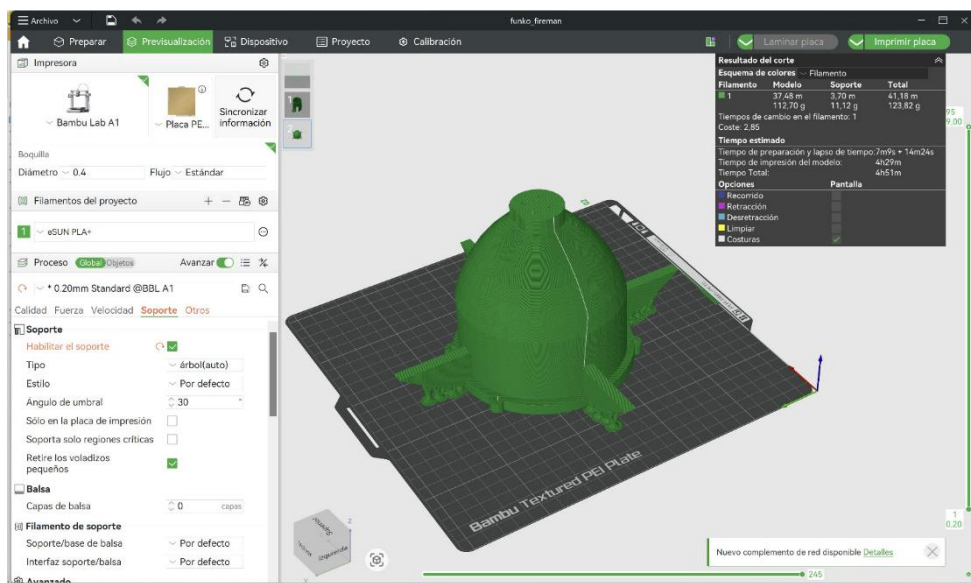
Encaje del modelado



Nota. Adaptación del modelo para que encaje en la superficie de la impresora.

Figura 21

Configuración de los parámetros de impresión



Nota. Parámetros de impresión necesarios para la estructura.

Como el siguiente paso, se preparó la impresora para iniciar el proceso de impresión. Donde se cargó el material PLA a la impresora, y se corroboró de que el equipo este bien calibrado. Asimismo, se configuró otros parámetros, tales como la temperatura del extrusor y de la cama de impresión, con el fin de prevenir fallos durante la impresión.

Finalmente, se supervisó el proceso de impresión durante todo el desarrollo, con el objetivo de detectar y corregir posibles errores y evitar cualquier accidente. Una vez concluido el proceso, se verificó que la estructura del submarino haya sido impresa correctamente y cumpla con las dimensiones y características establecidas en el diseño para su respectivo ensamblado como se muestra en la **Figura 22**.

Figura 22

Prototipo ensamblado



Nota. Elaborado con impresión 3D

5.3. Integración electrónica

Se realizó el montaje, interconexión y el aseguramiento del sistema electrónico de control, esto con el objetivo de garantizar una operación eficaz y segura. La integración se estructuró con los tres subsistemas principales: Alimentación, propulsión y gestión del lastre, asegurando una comunicación correcta entre el RC, el receptor y los actuadores del sistema.

Como fuente de energía se utilizó una batería LiPo 4S de 1300 mAh, está encargada de alimentar todo el sistema. Se hizo uso de receptor RC Apisqueen de 6 canales, esta se empleó como elemento central de control, recibiendo señales del transmisor, además de distribuir las órdenes a los distintos actuadores mediante señales PWM.

El sistema de propulsión se integró con dos motores brushless de 75 mm, controlados por dos ESC de 45 A. Estos elementos fueron conectados utilizando conectores tipo banana de 4.0 mm, esto garantiza una conexión segura, a la vez que mitiga las pérdidas eléctricas.

El control de inmersión se implantó mediante un actuador lineal micro eléctrico, accionado por un controlador de motor DC de 1A. Este actuador hace desplazar de forma simultánea los émbolos de las 2 jeringas de 60ml, permitiendo el ingreso y salida de agua del sistema de lastre. De esta manera se puede controlar la flotabilidad del prototipo, en base a la lógica de control establecidos y validada previamente en la simulación desarrollada en MATLAB.

Las señales de control fueron configuradas mediante el protocolo PWM, estableciendo 1000 μ s para reserva máxima, 1500 μ s como punto neutro y 2000 μ s para avance máximo.

También se habilitó la telemetría de voltaje en el transmisor RC, con la finalidad de supervisar en tiempo real el estado de carga de la batería durante la operación.

Por último, como se muestra en la **Figura 23**, para proteger la electrónica del ingreso de agua, la estructura del prototipo impresa en PLA se recubrió con una capa de resina epóxica. Y para las salidas de los cables y las uniones del cuerpo del submarino se sellaron con silicona RTV, lo que garantizó la estanqueidad del sistema y la protección de los componentes internos.

Figura 23

Pruebas con los distintos componentes



Nota. Configuraciones del apartado electrónico para la realización de pruebas.

5.4. Protocolo de pruebas

En la primera etapa se realizaron pruebas de banco, las cuales se ejecutaron fuera del agua. En estas pruebas se verificó la correcta comunicación entre el transmisor y el receptor RC, el sentido de giro de los motores y el desplazamiento del actuador lineal, como se ve en la **Figura**

24. Asimismo, se ajustaron los límites de funcionamiento para evitar daños mecánicos en el sistema de lastre.

Figura 24

Verificación de conexión y aislamiento



Nota. Se puede visualizar que los diferentes controladores de los motores están conectados y sellados herméticamente

En la segunda etapa se efectuaron pruebas de estanqueidad y trimado. El prototipo fue sumergido en un tanque de pruebas, véase la **Figura 25**, a una profundidad aproximada de 15 cm durante 5 minutos, sin activar los sistemas de potencia. Una vez comprobado que no existían filtraciones, se ajustó el balance del submarino mediante contrapesos internos, con el fin de mantener una posición estable durante la inmersión.

Figura 25

Pruebas de estanqueidad y trimado



Nota. Se realizó la primera inmersión del prototipo en el agua.

Finalmente, en la tercera etapa se realizaron pruebas dinámicas en una piscina, como se muestra en la **Figura 26**. En estas pruebas se ejecutaron ciclos de inmersión y emersión hasta una profundidad máxima de 45 cm, evaluando el funcionamiento del sistema de lastre. Además, se analizó la estabilidad y la maniobrabilidad del prototipo durante movimientos de avance y giro, utilizando la cámara integrada para documentar el desempeño bajo el agua.

Figura 26

Pruebas dinámicas en una piscina



Nota. Se visualiza la inmersión de los desarrolladores del prototipo en las pruebas.

5.5.Desarrollo del prototipo

De acuerdo con el análisis de la primera versión del prototipo como se muestra en la Figura 15, el volumen del sistema era superior a los parámetros funcionales, por lo que se implementó un proceso de rediseño técnico integral con el objetivo principal de corregir las escalas en el software CAD, para dimensionar los componentes y conservar la integridad estructural.

Por lo cual, todas las tolerancias mecánicas se fijaron en 0.3 mm en la zona de acoplamiento y en los ejes para incrementar el ensamblaje evitando fricciones excesivas entre las piezas en contacto. También se modificó la configuración de la impresión utilizando el número de perímetros que permita reducir el porcentaje de relleno y así optimizar el uso del material (filamento); al mismo tiempo, se dio una nueva orientación a las piezas en la bandeja de impresión

para que los esfuerzos mecánicos no actúen paralelos con las capas y evitar rupturas por fatiga. En esta segunda versión también se aplicaron uniones (tornillería insertos térmicos) dentro, con encajes a presión, obteniendo satisfactoriamente una mejor estabilidad.

Durante la etapa de prueba del sistema de visión, se implementó un módulo ESP32-CAM, configurado como Access Point (AP) para poder transmitir imágenes en movimiento hacia dispositivos externos; sin embargo, en el trabajo técnico se determinó que la señal de radiofrecuencia de 2,4 GHz presenta una atenuación muy pronunciada al ser utilizada por debajo del agua, haciendo que el alcance de la señal resulte extremadamente corto. Esto se debe a la alta permitividad que presenta el agua, dado que el medio acuático es muy eficiente sesgando la energía que emite sobre los elementos que componen la antena integrada en el sistema. Por esta razón, en aplicaciones submarinas de profundidad o distanciase debe utilizar una antena externa cableada que sobresalga en la superficie; es absolutamente necesario realizar una mejora técnica para poder garantizar una buena recepción de la imagen.

En la **Figura 27**, se puede observar un módulo receptor que se está sincronizando con una computadora, la misma que genera un vínculo posterior con el radio control, para su correcto funcionamiento.

Figura 27

Sincronización receptor



Nota. Receptor en calibración con una computadora para su posterior aplicación.

Durante la validación del segundo prototipo, véase la **Figura 28**, se modificaron las dimensiones a unas dimensiones medias que permitiesen montar correctamente tanto los componentes del interior del prototipo de submarino como la arquitectura frontal que incorpora una lámina de acrílico transparente que protege el módulo de cámara y permite realizar la captura de imágenes submarinas sin que la estanqueidad del prototipo se vea comprometida. De manera técnica se debe considerar el uso de selladores epóxicos que se aplican en el perímetro del acrílico, de modo que puedan resistir la presión hidrostática que se produce en la inmersión.

También hay que destacar que se debe aplicar tratamientos anti empañamiento en la cara interna del visor para impedir la condensación de la humedad procedente del diferencial térmico que permiten los componentes electrónicos. De esta manera, se garantizan unos resultados ópticos que permiten ver y protegen los componentes del hardware del minisubmarino. Finalmente, la implementación del prototipo con esta estructura lo hace operativo para entornos acuáticos.

Figura 28

Segundo prototipo



Nota. Pruebas de ensamblaje del segundo prototipo.

Después de las pruebas realizadas al segundo prototipo en condiciones controladas, se deduce que el diseño tiene una inmersión y estabilidad hidrodinámica aceptables para el tiempo de inmersión estimado. La aplicación del PLA (Ácido Poliláctico) como material de fabricación ha demostrado presentar importantes defectos en cuanto a su alta rigidez y fragilidad que, al ser sometidos a las pruebas de ensamblaje y/o mantenimiento, terminaban fracturados mecánicamente.

Técnicamente, el PLA tiene una baja resistencia al impacto mientras que además suele deformarse o presentar unas grietas si se altera por un tiempo prolongado, por lo que la integridad estructural del prototipo y su estanqueidad podía verse comprometida, como se ve en la **Figura 29**. A causa de esta deterioración prematura y de la dificultad para asegurar la fiabilidad de la parte interna del hardware, se ha decidido el rechazo de esta solución; es importante mencionar que tras la revisión de detecciones de errores y defectos que se habían producido en los anteriores prototipos, posteriormente se solidificó el desarrollo del prototipo final del prototipo, el mismo que está diseñado adecuadamente para ser utilizado para entornos acuáticos.

Figura 29

Prototipo fallido



Nota. Deterioro y deformación interna del material utilizado

Este prototipo presenta una estructura y la resistencia a la presión hidrostática, hecho que ya fue superado en prototipos anteriores bajo pruebas de un entorno controladas. Técnica y estructuralmente, se ha dado un salto en la mejora del diseño del sistema de propulsión y de sellado de los motores y se busca lograr un funcionamiento dinámico con buena maniobrabilidad bajo el

agua. En el caso del sistema de transmisión de señal de mando se ha mejorado la estabilidad reduciendo el efecto de señales interferentes que obtenían los anteriores prototipos y se ha incrementado el rango operativo del prototipo.

En la **Figura 30**, se observa la utilización de materiales más tenaces, además de realizar un acabado superficial protector es la manera de limitar los efectos mecánicos que se producían en pruebas anteriores de ajuste. este diseño pasa a ser la síntesis de prototipos realizados en la mejora de hardware pasando por ende la etapa inicial de implementar un minisubmarino operativo.

Figura 30

Prototipo exitoso



Nota. Prototipo finalizado, cubierto con un material laminador para evitar filtraciones.

6. RESULTADOS

En la primera prueba de campo realizada en un entorno controlado, se produjo un fallo crítico relacionado con el control de profundidad del sistema de lastre debido a una carga excesiva,

véase la **Figura 31**, donde una cantidad excesiva de agua inundó los tanques hasta tal punto que se superó el límite de comunicaciones operativas.

Cuando esto ocurre, la señal RC se interrumpe, lo que provoca una pérdida de comunicación con el módulo de control de radio RC.

Figura 31

Prueba del Submarino



Nota. Prototipo totalmente sumergido debido a carga excesiva.

Se detectó una fuga en el compartimento del prototipo tras su recuperación física **Figura 32**, lo que afectó al receptor. La presencia de humedad en los circuitos electrónicos provocó una interrupción inmediata del funcionamiento de los motores sin escobillas, junto con el fallo de sus controladores.

Figura 32

Recuperación del submarino



Nota. Verificación de los problemas y fallos de comunicación del prototipo.

La estructura de PVC y PLA se desmontó por completo para limitar la cantidad de daños permanentes derivados de un cortocircuito o de la corrosión, como se observa en la **Figura 33**.

Tras aprovechar tanto un procedimiento de secado con aire forzado como una limpieza profunda exhaustiva con disolventes dieléctricos, se restauró la conductividad de las placas de circuito impreso y los conectores mediante estos métodos.

Figura 33

Desensamble del submarino



Nota. Se procedió con la limpieza, secado y verificación de los componentes, tras el ingreso de agua.

Antes de proceder al montaje del prototipo, se realizaron pruebas con el prototipo en estado abierto con el fin de verificar que funcionaba correctamente y que era capaz de operar. Estas pruebas confirmaron que el actuador lineal que accionaba los pistones de la jeringa se desplazaba correctamente **Figura 34** y que recibía señales de los transmisores tal y como estaba previsto.

Figura 34

Actuador



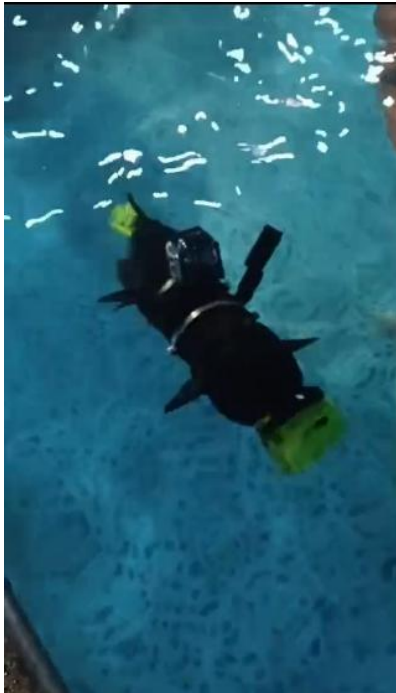
Nota. Prueba de funcionamiento de los actuadores.

Prueba 2

Una vez reparados los daños, se procedió a la segunda fase de pruebas en el entorno controlado como se puede observar en la figura 35. En esta prueba se validó la respuesta del prototipo a las señales del control remoto (RC), y su movilidad validando sus ejes de avance, retroceso y giro.

Figura 35

Movilidad

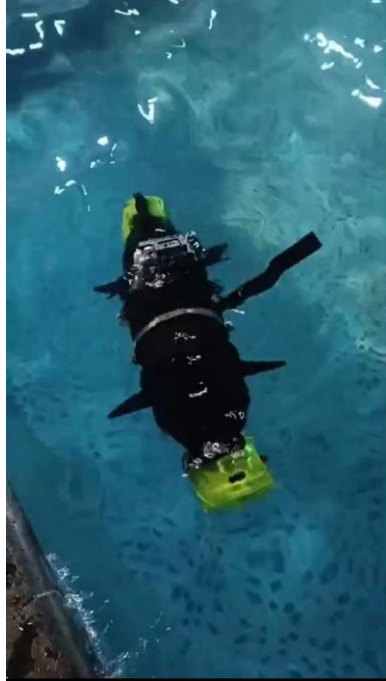


Nota. Prueba de funcionamiento de movilidad.

Se logró una inmersión controlada alrededor de 30 a 40 cm de profundidad como se ve en la figura 36 gracias a su sistema de gestión de lastre que llenaba la cantidad de agua suficiente en los compartimentos con jeringas.

Figura 36

Prueba

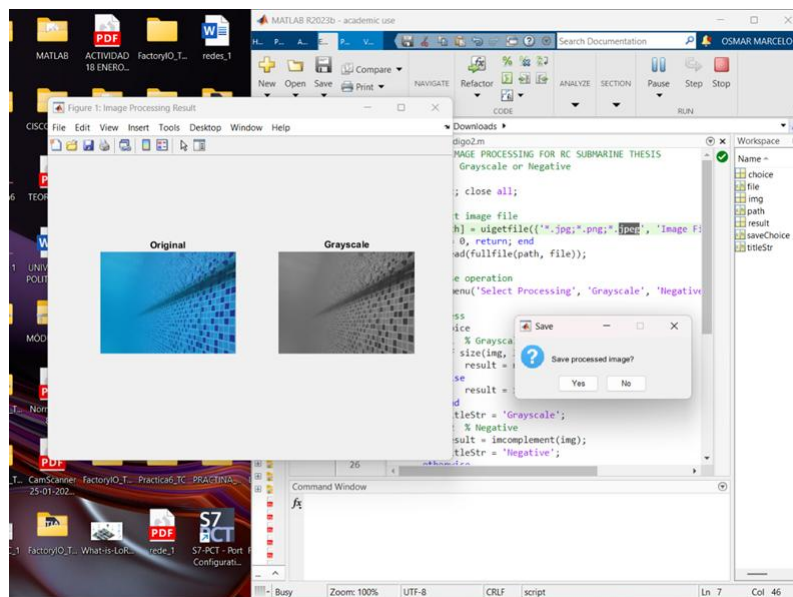


Nota. Prueba de funcionamiento de sumersión e inmersión.

Finalmente, como se ve en la figura 38, de forma diferida se adquirió las imágenes obtenidas por la cámara y mediante el uso de un código de programación en Matlab se pudo hacer un procesamiento de imágenes con las fotos.

Figura 37

Imágenes



Nota. Visualización y procesamiento de imágenes

7. CRONOGRAMA

En el desarrollo del Trabajo de Titulación, se diseñó un cronograma de actividades distribuido semanalmente, abarcando el periodo académico P67. Este cronograma es una herramienta importante porque en ella se estableció la organización y el progreso en cada etapa del Trabajo de Titulación. La planificación tuvo como objetivo coordinar la ejecución de las tareas de manera estructurada, permitiendo que todas las actividades programadas se completaran en el tiempo estipulado como se muestra a continuación en la **Tabla 1**.

Tabla 1.*Cronograma del Trabajo de Titulación*

Actividades	Tiempo								
	Meses	Noviembre				Diciembre			
	Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4
Elección de tema de proyecto de titulación.		✓							
Definición de objetivos generales y específicos.		✓							
Búsqueda de componentes y elementos mecánicos y electrónicos para el minisubmarino.			✓						
Primeros bocetos de estructura del minisubmarino.				✓					
Composición de justificación, marco teórico, metodología y presupuesto.		✓		✓	✓				
Diseño del cuerpo y mecanismo de desplazamiento del minisubmarino.					✓	✓			
Diseño del sistema de flotabilidad.								✓	
Impresión 3D de mecanismos y piezas del minisubmarino.							✓	✓	
Programación del movimiento del submarino.									✓
Implementación y pruebas con la video cámara.									✓

Ensamble de elementos mecánicos, estructurales y electrónicos del minisubmarino.	✓
Pruebas en entorno controlados.	✓ ✓
Posibles ajustes en software y hardware del minisubmarino.	✓
Pruebas finales del minisubmarino en entorno preparado y controlado.	✓

Nota. Se realizó un cronograma detallado de las actividades para el desarrollo del Trabajo de Titulación.

8. PRESUPUESTO

La implementación del Trabajo de Titulación se llevó a cabo en un módulo disponible en el Laboratorio de Automatización Industrial de la Universidad Politécnica Salesiana, por lo cual el presupuesto está diseñado para reflejar los aspectos esenciales que aseguren el desarrollo impecable del Trabajo de Titulación. Estos costos incluyeron elementos fundamentales que permitieron al desarrollo de la simulación, los cuales fueron indispensables para la ejecución del Trabajo de Titulación. A continuación, en la **Tabla 2**, se muestra a detalle los elementos y el presupuesto estimado.

Tabla 2.*Presupuesto del Trabajo de Titulación*

DESCRIPCIÓN	COSTO UNIDAD	CANTIDAD	COSTO TOTAL
Horas de ingeniería empleadas	\$3,05	160 horas	\$488
Filamento PLA+ para impresión 3D	\$20,00	2 kg	\$40
Propulsores Apisqueen de 75mm	\$40	2	\$40
Cargador Balanceador de Lipo	\$14	1	\$14
Cámara Sumergible	\$27	1	\$27
Horas de impresión	\$0,95	80 horas	\$76
Batería lipo 4s 14,8v 1300mah 95c	\$50	1	\$50
Tubo de Plástico 100mmX500mm	\$10	1	\$50
Micro actuador lineal de 4 pulgadas	\$44	1	\$44
Jeringas 60ml	\$2	2	\$4
Resina Epóxica Transparente	\$20	1	\$20
Sello de Silicona RTV	\$1,50	1	\$1,50
Módulo de control y Control RC	\$70	1	\$70
Kit de Tornillo M4	\$10	1	\$10
TOTAL			\$934,50

Nota. Esta tabla muestra el costo y la cantidad que se necesita para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

9. CONCLUSIONES

- Se validó el diseño mecánico basado en una estructura cilíndrica que permitió una distribución uniforme de la presión, y garantizo la impermeabilidad de los componentes electrónicos interno.
- Mediante un radio control se precisó la estabilidad del mini submarino dentro del agua
- Mediante la implementación de jeringas médicas y un actuador lineal se integró un control del nivel del agua dentro del mini submarino, que permitió el control del sumersión e inmersión del mismo.
- Después de varias etapas de prueba, se logró validar el mini submarino en un entorno controlado, donde al sumergirse se obtuvo control completo del mismo, manteniendo una comunicación ideal en toda la fase de pruebas.
- Se logró la implementación de un sistema de adquisición de imágenes y video mediante la integración de una cámara subacuática con almacenamiento en memoria SD. Posteriormente, la información recopilada se logró ser procesada y analizada a través de un algoritmo desarrollado en el software MATLAB, permitiendo así la interpretación de los escenarios explorados y la validación del sistema de visión.

10. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se proporcionan para el desarrollo de un futuro prototipo basándose en los resultados y las limitaciones encontradas durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

- **La importancia de simular antes de implementar:** crear una simulación en MATLAB para entender el proceso de inmersión de un submarino tomando de referencia el uso de las leyes de Newton y el principio de Arquímedes fue indispensable para comprender mejor, cómo se comportaría el submarino en lo que respecta al hundimiento/flotación, lo que permitió confirmar que la lógica de control sería correcta antes de proceder a la construcción del submarino físico.
- **Sistema de visión:** Aunque se obtuvieron imágenes con éxito, se recomienda avanzar hacia el procesamiento de imágenes digitales en tiempo real. Un microordenador Raspberry Pi proporcionaría una plataforma para implementar algoritmos de visión artificial para la detección de obstáculos y el reconocimiento de objetos, así como para la fotogrametría submarina.
- **Sistemas de comunicaciones:** Las señales de radiofrecuencia (RF) utilizadas para la comunicación experimentan enormes niveles de atenuación cuando se propagan a través de las distintas capas del agua, lo que limita la profundidad a la que puede operar el robot. Por lo tanto, las futuras versiones del prototipo deberían explorar la posibilidad de comunicaciones por cable y/o comunicación acústica.
- **Sensores de navegación:** Con el fin de mejorar la autonomía del robot, se recomienda la incorporación de una unidad de medición inercial (IMU) y un sensor de presión (medidor

de profundidad). Esto permitirá el uso de un control de bucle cerrado (PID) para mantener la profundidad y el rumbo, lo que reducirá la carga de trabajo del operador.

- **Superación de las barreras del entorno acuático:** Los resultados de las pruebas reforzaron el conocimiento de que el agua es un entorno extremadamente hostil para los dispositivos electrónicos. Donde el percance de la transmisión inalámbrica como el Wi-Fi del ESP32 es prácticamente inexistente bajo el agua al momento de querer implementar un sistema de video en tiempo real. Sin embargo, al utilizar una combinación de resina epoxi y silicona RTV para crear un sellado adecuado se pudo proteger los componentes internos del daño causado por el agua y evitar problemas durante las pruebas.
- **Mejora del sistema de lastre para aumentar la escala:** Para aumentar el tamaño o la capacidad de carga útil/tonelaje de la embarcación sumergible. Se recomienda sustituir el sistema de jeringas por bombas peristálticas o de engranajes conectadas a tanques rígidos (de polímero) y flexibles (es decir, vejigas). Este enfoque le permitiría manejar mayores volúmenes de agua a un ritmo mucho más rápido.
- **Ampliación del entorno de pruebas:** los futuros entornos de pruebas deben controlarse mediante corrientes o a mayores profundidades (por debajo de 1 metro) para probar completamente la resistencia hidrodinámica del casco sumergible y las fuerzas de propulsión de la hélice o hélices en condiciones más difíciles y, por lo tanto, validar la integridad del diseño frente a las fuerzas de carga externas.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaraz, M., Gudiño, J., & Zamora, Ó. (2022). Robot submarino: estado del arte y diseño. *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 19.
- BambuLab. (2026). *Bambu Lab*. <https://bambulab.com/es/about-us>
- Barrales Romero, M. (2022). *Diseño y construcción de un minisubmarino explorador, equipado con un sistema de lastre*. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Becher, B. (23 de enero de 2024). *Robótica Subacuática: Cómo Funciona y Ejemplos*. Built.in: <https://builtin.com/articles/underwater-robotics>
- Carrasco Alcaraz, M. (19 de Noviembre de 2022). *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*. Robot submarino: estado del arte y diseño: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/xikua/issue/archive>
- Cepeda, M., & Sang, F. (2023). Exploración de vehículos autónomos y operados remotamente en inspecciones de estructuras marinas. *Ciencias e Ingeniería Marinas*, 2172.
- Cobelas, E. (2025). Control digital de la gestión de energía de un sistema híbrido pila de combustible-batería. *Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València*, 20-30.
- Cong, Y. (2021). Underwater robot sensing technology: A survey. *Fundamental Research*, 337-345.
- DeepTecker. (2023). <https://www.deeptrekker.com/cl/resources/rov-submarinos>
- Green Energy. (2022). *¿Qué Es Un Vehículo Eléctrico?* <https://www.greenenergyconsumers.org/es/drivegreen/learnmore/introtoevs/whatisanev>

Hagler, G. (2019). Principio de Arquímedes. *EBSCO*, 1.

HIWIN. (2020). *Ballscrew Technical information*. Taiwan.

Iñigo, R., & Vidal, E. (2022). *Robots Industriales Manipuladores*. Barcelona: Centro de publicaciones del Campus Nord.

Insights. (2023). *Automóviles y vehpiculos eléctricos*. <https://es.statefarm.com/simple-insights/automoviles-y-vehiculos/deberias-comprar-un-carro-electrico>

Katsoulis, E. (2017). *TechEdu*. Control remoto (RC): <https://techlib.net/techedu/control-remoto-rc/>

Kumar, A. (31 de Diciembre de 2024). *Scispace*. Development of an autonomous underwater robot: <https://scispace.com/papers/development-of-an-autonomous-underwater-robot-33aqpnssseu>

Munilla, V. (13 de Junio de 2023). *GEenciclopedia*. Principio de Arquímedes: qué es y para qué sirve: <https://www.geoenciclopedia.com/principio-de-arquimedes-que-es-y-para-que-sirve-680.html>

Noaa, A. (2024). *What is an ROV?* Ocean Exploration: <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/rov.html>

Paredes, R. (2023). Propuesta de prototipo de un bote eléctrico . *Realizar el diseño y construcción de un prototipo de bote eléctrico a pequeña escala*. Universidad Tecnica del Norte, Ibarra.

Pinto, C., & Sánchez, S. (2025). *Sumergidos Con Arquímedes*:. Universidad Distrital Francisco José de Caldas:

<https://www.proquest.com/openview/aa89575e9bca851311b7b5ee87bfbe5f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

Salgado, A. (2016). *CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A ESCALA*. Universidad Pontificia Comillas:

<https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/14321/TFG000957.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Shen, Y. (2024). *IEEE Xplore* . Deep Learning Powered Estimate of The Extrinsic:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10684905>

Sudhoff S , & Krause, P. (2022). Modos de funcionamiento del motor de CC sin escobillas con un inversor de 120 grados. *EEE Transactions on Energy Conversion*, 558-564.

12. ANEXOS

Anexo A. Diseños del prototipo

En el siguiente enlace se adjunta el diseño del prototipo hecho en Inventor

Enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1V4uRHHY3IkObgzHIMDgSOKVLSurKtUcs?usp=sharing>

Anexo B. Código de adquisición de imágenes

```
% SIMPLE IMAGE PROCESSING FOR RC SUBMARINE THESIS
```

```
% Options: Grayscale or Negative
```

```
clear; clc; close all;
```

```
% 1. Select image file
```

```
[file, path] = uigetfile({'*.jpg;*.png;*. jpeg', 'Image Files'}, 'Choose an image');  
if file == 0, return; end
```

```
img = imread(fullfile(path, file));
```

```
% 2. Choose operation
```

```
choice = menu('Select Processing', 'Grayscale', 'Negative');
```

```
% 3. Process
```

```
switch choice
```

```
    case 1 % Grayscale
```

```
        if size(img, 3) == 3
```

```

        result = rgb2gray(img);

    else

        result = img; % already grayscale

    end

    titleStr = 'Grayscale';

case 2 % Negative

    result = imcomplement(img);

    titleStr = 'Negative';

otherwise

    return;

end

% 4. Display original and processed side by side

figure('Name', 'Image Processing Result');
subplot(1,2,1); imshow(img); title('Original');
subplot(1,2,2); imshow(result); title(titleStr);

% 5. Option to save

saveChoice = questdlg('Save processed image?', 'Save', 'Yes', 'No', 'Yes');

if strcmp(saveChoice, 'Yes')

    [saveFile, savePath] = uiputfile({'*.jpg'; '*.png'}, 'Save as');

    if saveFile ~= 0

        imwrite(result, fullfile(savePath, saveFile));

```

```
    disp('Image saved.');
```

```
end
```

```
end
```

Anexo C. Código de la simulación

El código de Matlab para la simulación del submarino e interpretación de este se encuentra en el siguiente repositorio.

Repositorio: https://github.com/ManuelBravo456/Codigo_Simulacion_Tesis.git

```
function simulacion_mini_submarino()

    clear; clc; close all;

    %% 1. Parámetros Físicos

    g = 9.81;

    rho_agua = 1000;

    diametro = 0.11;

    radio = diametro / 2;

    longitud = 0.60;

    volumen_sub = pi * (radio^2) * longitud; % ~5.7 Litros

    masa_desplazada = volumen_sub * rho_agua;
```

```

masa_seca = 3.5;

masa_lastre_max = 2.5;

coef_drag = 1.0;

area_transversal = pi * radio^2;

% AJUSTE: Tasas más rápidas para cumplir la misión en 30 segundos

tasa_llenado = 0.4; % kg/s (Llenado ágil)

tasa_vaciado = 0.5; % kg/s (Vaciado potente)

%% 2. Configuración de Tiempo (30 SEGUNDOS)

dt = 0.05;

t_total = 30; % DURACIÓN SOLICITADA

t = 0:dt:t_total;

N = length(t);

pos = zeros(1, N);

vel = zeros(1, N);

acc = zeros(1, N);

lastre = zeros(1, N);

estado_str = strings(1, N);

```

```

profundidad_piso = -10;

%% 3. Bucle de Física

for i = 1:N-1

    % --- CONTROL DE MISIÓN (Ajustado a 30s) ---

    % FASE 1: Bajar (0 a 10 seg)

    if t(i) < 10

        lastre(i) = min(masa_lastre_max, lastre(max(1, i-1)) + tasa_llenado * dt);

        estado_str(i) = "INMERSIÓN";

    % FASE 2: Esperar en el fondo (10 a 18 seg)

    elseif t(i) < 18

        lastre(i) = lastre(i-1);

        estado_str(i) = "FONDO";

    % FASE 3: Subir (18 seg en adelante)

    else

        % CORRECCIÓN SOLICITADA:

        % Si ya llegamos a la superficie (pos >= 0), NO seguir soplando lastre.

        if pos(i) >= -0.1 % Margen pequeño cerca de 0

            lastre(i) = lastre(i-1); % Mantener lastre actual

            estado_str(i) = "EN SUPERFICIE (Recuperado)";

```

```

else

    % Si seguimos bajo el agua, soplar lastre

    lastre(i) = max(0, lastre(i-1) - tasa_vaciado * dt);

    estado_str(i) = "ASCENSO (Soplando Lastre)";

end

end

% --- CÁLCULO DE FUERZAS ---

masa_total = masa_seca + lastre(i);

W = -masa_total * g; % Peso

if pos(i) >= 0; porcentaje = 0.6; else; porcentaje = 1.0; end

E = rho_agua * g * volumen_sub * porcentaje; % Empuje

D = -0.5 * rho_agua * coef_drag * area_transversal * vel(i) * abs(vel(i)); % Drag

F_neta = W + E + D;

acc(i) = F_neta / masa_total;

vel(i+1) = vel(i) + acc(i) * dt;

pos(i+1) = pos(i) + vel(i+1) * dt;

% Límites

```

```

if pos(i+1) > 0
    pos(i+1) = 0; vel(i+1) = 0;
elseif pos(i+1) < profundidad_piso
    pos(i+1) = profundidad_piso;
    vel(i+1) = -vel(i) * 0.1;
end
end

lastre(N) = lastre(N-1); estado_str(N) = estado_str(N-1);

%% 4. Visualización
f = figure('Color', [0.1 0.1 0.15], 'Name', 'Simulación 30s', ...
    'Position', [100 100 1000 600]);

subplot(1, 3, [1 2]);
axis([-2 2 (profundidad_piso - 2) 2]);
hold on; grid on;
set(gca, 'Color', [0 0.2 0.4], 'XColor', 'w', 'YColor', 'w');
title('Prueba Rápida (30s)', 'Color', 'w');

patch([-2 2 2 -2], [0 0 -15 -15], [0 0.4 0.7], 'FaceAlpha', 0.3, 'EdgeColor', 'none');
patch([-2 2 2 -2], [profundidad_piso-1 profundidad_piso-1 profundidad_piso
profundidad_piso], ...
    [0.6 0.5 0.3], 'EdgeColor', 'none');

```

```
% Submarino
```

```
th = linspace(0, 2*pi, 30);
```

```
sub_x = (longitud/2) * cos(th);
```

```
sub_y = (diametro/2 * 20) * sin(th);
```

```
hSubBody = patch(sub_x, sub_y, [1 0.8 0], 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 1.5);
```

```
% Burbujas
```

```
num_burbujas = 10;
```

```
tamanos = linspace(10, 50, num_burbujas);
```

```
hBurbujas = scatter(zeros(1,num_burbujas), zeros(1,num_burbujas), ...
```

```
    tamanos, 'w', 'filled', 'MarkerFaceAlpha', 0.6);
```

```
bx = rand(1, num_burbujas) * 0.4 - 0.2;
```

```
by = zeros(1, num_burbujas) - 100;
```

```
hText = text(-1.8, 1, " ", 'Color', 'w', 'FontSize', 10, 'FontName', 'Courier');
```

```
hStatus = text(0, profundidad_piso + 1, " ", 'Color', 'y', 'FontSize', 12, ...
```

```
    'HorizontalAlignment', 'center', 'FontWeight', 'bold');
```

```
subplot(1, 3, 3);
```

```
set(gca, 'Color', [0.9 0.9 0.9]);
```

```
yyaxis left; hPlotPos = plot(0,0, 'b-', 'LineWidth', 2); ylim([profundidad_piso 1]);
```

```

ylabel('Profundidad (m)');

yyaxis right; hPlotLastre = plot(0,0, 'r-', 'LineWidth', 2); ylim([0 3]);

ylabel('Lastre (kg)');

grid on; title('Datos');

%% 5. Animación

disp('Iniciando simulación de 30 segundos...');

for k = 1:1:N

    if ~isvalid(f); break; end

    current_y = pos(k);

    set(hSubBody, 'YData', sub_y/10 + current_y, 'XData', sub_x);

    % Solo mostrar burbujas si ESTÁ SUBIENDO y AÚN NO LLEGA A SUPERFICIE
    if contains(estado_str(k), "Soplando") && pos(k) < 0

        by = by + rand(1, num_burbujas) * 0.2;

        reset_idx = by > current_y + 2 | by < current_y;

        by(reset_idx) = current_y + (rand(1, sum(reset_idx)) * 0.2);

        set(hBurbujas, 'XData', bx, 'YData', by);

    else

        set(hBurbujas, 'YData', repmat(-100, 1, num_burbujas));

    end

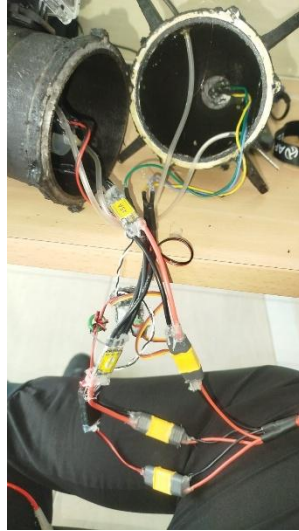
```

```
set(hText, 'String', sprintf("T: %.1fs\nProf: %.2fm\nLastre: %.2fkg", t(k), pos(k),  
lastre(k)));  
  
set(hStatus, 'String', estado_str(k));  
  
set(hPlotPos, 'XData', t(1:k), 'YData', pos(1:k));  
  
set(hPlotLastre, 'XData', t(1:k), 'YData', lastre(1:k));  
  
drawnow;  
  
pause(dt);  
  
end  
  
end
```

Anexo D. Validación del prototipo.



Anexo E. Parte interna de prototipo.



Anexo F. Visualización bajo el agua



Anexo G. adquisición y procesamiento de imágenes

