



# BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

“VEHÍCULO ACUÁTICO SUMERGIBLE CON SISTEMA  
DE ESTABILIZACIÓN”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA  
COMPUTACIÓN**

PRESENTA:

ENRIQUE CORTÉS RODRÍGUEZ

ASESOR:

DR. JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ AMECA



PUEBLA, PUE. NOVIEMBRE 2019



## **Dedicatoria**

La presente tesis está dedicada a todas las personas que me acompañaron durante este proceso y a Dios por permitirme cumplir un reto más en mi vida.

A mis padres por todo su apoyo incondicional, sus consejos y a pesar de la distancia todo su amor que siempre me han brindado.

A mi hermana por ser un espejo en el cual me quiero reflejar pues sus logros y sus deseos de superación me llevan a admirarla cada día más.

A mi novia por todo el apoyo, cariño, motivación y por que nunca dejo de confiar en mí a pesar de los buenos y malos momentos.

A mi asesor por todo el tiempo brindado y por nunca dejar de creer en la culminación de este trabajo.

A todos mis amigos que, de diferentes maneras, han sido parte importante de este reto.



# Índice

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Descripción del problema.....	6
1.3 Objetivos generales y específicos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Hipótesis .....	8
1.5 Alcances y limitaciones .....	8
1.5.1 Alcances .....	8
1.5.2 Limitaciones.....	8
1.6 Justificación .....	9
1.7 Organización de la tesis.....	9
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	11
2.1 Principio de Arquímedes .....	11
2.2 Presión Hidrostática .....	12
2.3 Fuerza de empuje .....	13
2.4 Exploración submarina.....	13
2.5 Clasificación de vehículos sumergibles.....	14
2.5.1 Submarinos Operados Remotamente, ROVs.....	15
2.5.2 Submarinos Autónomos, AUVs .....	16
2.5.3 Submarinos Autónomos para Intervenciones, IAUVs .	17
2.6 Componentes de los submarinos.....	18

2.6.1 Cabina .....	18
2.6.2 Sistemas de propulsión .....	19
2.6.3 Sistema de emersión e inmersión.....	21
2.6.4 Fuente de energía .....	22
2.7 Sistema embebido .....	22
2.8 Acelerómetro y Giroscopio (MPU6050).....	23
Capítulo 3: Desarrollo del prototipo .....	25
3.1 Sistema de Inmersión-Emersión y Estabilización (SIE). .....	25
3.2 Control de movimiento .....	29
3.3 Diseño de la estructura del prototipo.....	31
3.4 Implementación estructural del prototipo. ....	37
Capítulo 4: Experimentos y resultados .....	43
4.1 Experimentos en ambiente controlado.....	43
4.2 Resultados. ....	47
Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros .....	52
Bibliografía .....	54



# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Antecedentes

Como es bien sabido, aproximadamente el 70% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua [1]. Los océanos permiten el transporte y comercialización de productos y materias primas entre países. Para investigadores y científicos los vehículos acuáticos sumergibles han sido un tema de interés durante las últimas tres décadas, donde el problema general es el diseño y construcción de vehículos submarinos pequeños, versátiles y no tripulados, con diferentes objetivos como realizar misiones de exploración y explotación de recursos en aguas profundas, levantamiento oceánico profundo, rastreo de cables y tuberías, aplicaciones militares, mapeo detallado del fondo marino para infraestructura submarina, mantenimiento de observatorios de fondo marino, campos petrolíferos sumergidos y recuperación de estaciones bentónicas entre otras [2]. Las primeras exploraciones científicas se llevaron a cabo mediante vehículos submarinos ocupados por humanos.

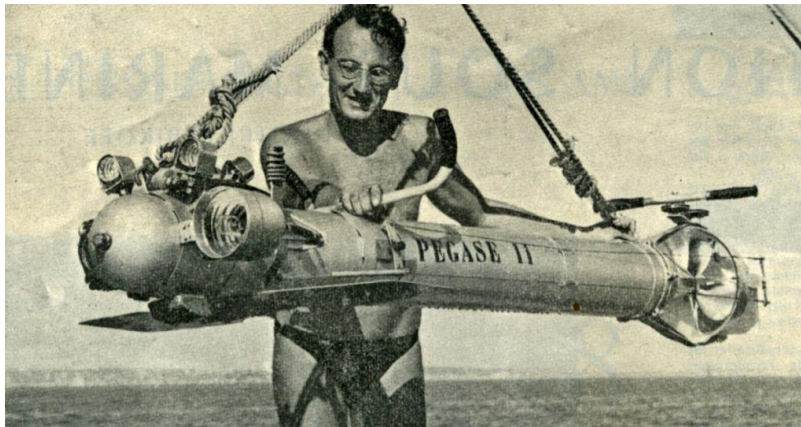
Recientemente, los robots submarinos han comenzado a revolucionar la exploración del lecho marino, ofreciendo generalmente mayor cantidad de información a un costo más reducido y seguro para el hombre. Por otro lado, estos robots han permitido realizar operaciones en aguas profundas, y también, intervenir en desastres como lo son las fugas en instalaciones petrolíferas.

La historia de los robots submarinos comienza a principios de la década de los 50 del siglo pasado con la construcción de un robot submarino operado remotamente nombrado POODLE desarrollado por Dimitri Rebikoff en Francia.

Desde ese entonces varios robots submarinos teleoperados y autónomos han sido desarrollados [3].

Dimitri Rebikoff (1921-1997) (Figura 1) y Ada Rebikoff (1913-2011) estuvieron entre los grandes pioneros del buceo, y de la fotografía subacuática en particular.

Dimitri Rebikoff desarrolló el primer flash electrónico subacuático, estereofotografía y cámaras de película, el primer scooter subacuático del mundo y el primer vehículo de control remoto (ROV). Su contribución al desarrollo de la fotografía submarina fue la innovación [4].



**Figura 1.** Dimitri Rebikoff y su deslizador Pegase II

La exploración a distancia de ambientes acuáticos mediante herramientas tecnológicas hace posible la localización de objetos, fallas en instalaciones subacuáticas como grietas, fisuras en tuberías y la realización de estudios de contaminación en los cuerpos de agua. También es posible localizar y observar el comportamiento de especies acuáticas para su estudio y control.

Actualmente existen diversos vehículos acuáticos orientados a diferentes aplicaciones tales como: recreativas, militares, investigación, desarrollos tecnológicos e industriales. A continuación, se mencionan algunos de los trabajos que se están realizando.

Existen diferentes trabajos que proponen diversas soluciones al problema de estabilidad, emersión e inmersión de los vehículos submarinos, como en [5] el cual describe dos sistemas de control de balastro variable, el primero proporciona un control de profundidad, mientras que el segundo permite ajustar el centro de gravedad a lo largo del eje horizontal fijo del cuerpo del submarino, se presenta una descripción de las ecuaciones de movimiento, el diseño y la implementación de los tanques de lastre, y se describen los controladores desarrollados.

En [6] se formula un modelo dinámico sobre los parámetros del sistema de hardware para determinar la velocidad de elevación y las posiciones de profundidad alcanzables para varias entradas del perfil de potencia. Las pruebas experimentales valida la eficacia del sistema del control de flotabilidad gracias a las simulaciones realizadas del prototipo desarrollado.

También se han desarrollado nuevas estrategias de control proporcional integral derivativo (PID) como en [7-9] donde permiten que los submarinos trabajen en colaboración con los sistemas de lastre variable delantero y trasero. El suministro de energía interno y las mediciones del ángulo se filtraron utilizando un filtro pasa bajas. Los resultados muestran que los sistemas trabajan juntos de manera efectiva para lograr la profundidad y el peso deseados.

El sistema de lastre para los submarinos también se ha controlado con una arquitectura jerárquica como en [10] donde se propone un sistema basado en on-off, sin embargo, no se ha tomado en cuenta la influencia de perturbaciones externas a los vehículos.

El modelo propuesto en [11], [12] con motores Stirling como sistemas de propulsión hacen que el submarino sea confiable y económico. Sin embargo, tiene algunas deficiencias, como la incapacidad de aplicación para

obtener información altamente precisa debido a la falta de un sistema de control inteligente, y también algunas fallas internas.

En [13] se presenta un nuevo tipo de estructura de robot submarino en forma de plato, este fue optimizado por los resultados de la simulación hidrodinámica. Estos resultados dieron una referencia importante a la estimación de la fuerza, el diseño de maniobrabilidad y el análisis del robot en forma de plato.

En el diseño de piezas y estructuras para vehículos submarinos se han utilizado herramientas de diseño asistido por computadora como en [14] en el cual se presenta un modelo 3D recientemente mejorado de varias hélices de chorro de agua, la estructura del robot se ilustra brevemente. Para superar las propiedades indeseables del modelado en 2D, se diseña un modelado más preciso, que adopta un sensor de celda de carga de 6 ejes para detectar las fuerzas de propulsión en las direcciones de los ejes (x, y) y los pares simultáneamente. Posteriormente, se llevan a cabo una serie de experimentos submarinos para descubrir las relaciones cerradas entre los ángulos de regulación en el plano horizontal, vertical, las fuerzas y momentos generados por una sola hélice en el robot. Los resultados experimentales mostraron que el sistema de propulsión avanzado es mucho más apropiado para estudiar robots submarinos.

En la Universidad Jaume de España se elaboró un submarino que a diferencia de otros métodos basados en su mayoría en sistemas de control remoto o con un único propósito, el proyecto coordinado por Pedro J. Sanz, catedrático de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial de esta universidad, propone una nueva metodología que proporciona al robot una capacidad multitarea de destreza y manipulación autónomas para las operaciones de intervención en espacios submarinos desconocidos [15].

En Colombia la unión de la Universidad Santo Tomas y la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, con apoyo de la empresa Ecopetrol y el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) del gobierno de Colombia, han planteado la construcción de un prototipo de submarino robotizado, cuya función principal es poder sumergirse en zonas acuáticas a 500 m de profundidad, transmitiendo videos en alta definición en tiempo real para la exploración de ambientes acuáticos. El funcionamiento consiste en enviar señales de advertencia cuando el robot encuentre posibles obstáculos, esto gracias a la lectura de sensores de proximidad, también es capaz de recolectar muestras de materiales y otras variables mediante el uso de un pequeño brazo robótico.

Las aplicaciones de este proyecto se orientan a la arqueología marina, vigilancia de oleoductos, mediciones oceanográficas e inspección de estructuras sumergidas. El submarino está equipado con dos cámaras y funciona con energía eléctrica [16] (Figura 2).



**Figura 2.** Prototipo de la Universidad Santo Tomas y la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín.

Comercialmente existen submarinos controlados por radiofrecuencia, contruidos principalmente de plástico de fácil manejo, pero solo se utiliza para navegar bajo el agua ya que no cuenta con alguna herramienta extra para poder realizar otra función.

La compañía PowerVisionTechnologyGroup, ha desarrollado un robot submarino llamado PowerRay™ (Figura 3), basado en alta tecnología y diseñado para revolucionar la pesca, permite a los usuarios ver fotografías o videos en tiempo real mediante su sistema Wi-Fi. PowerRay puede bucear a una profundidad de hasta 30 metros bajo el agua. Su sistema sónar puede detectar peces hasta 40 metros por debajo de este robot [17].



**Figura 3.** PowerRay™

## **1.2 Descripción del problema**

Los problemas a los que se han enfrentado los diseñadores y constructores de vehículos acuáticos sumergibles son de diversa índole, se puede comenzar desde enfrentarse a variables externas como la fuerza de flotabilidad, presión hidrostática y fuerza de empuje. Otro problema es el diseño hidrodinámico del cuerpo del vehículo, donde se debe de tomar en cuenta el centro de gravedad, distribución de componentes, estabilidad, tipos de materiales y aislamiento ante filtraciones de agua. Como siguiente etapa se encuentra el problema de la metodología de la programación donde se

busca controlar y estabilizar al vehículo ante la existencia de perturbaciones externas como oleaje, arrastre del agua y corrientes generadas por otros cuerpos. La electrónica es otro de los problemas ya que se debe de tomar en cuenta variables de temperatura, corriente, voltaje y potencia, además de contar o adaptar los materiales de forma que sean utilizables bajo el agua.

Para finalizar la construcción de este tipo de vehículos se debe probar el sellado, capacidad de flotación, movimientos de inmersión-emersión, estabilidad y movimientos de translación, en ambientes controlados.

Este tipo de vehículos tiene un gran número de aplicaciones, principalmente, en la sustitución del hombre en tareas de inspección, exploración, búsqueda y recolección en ambientes peligrosos u hostiles, y en la realización de tareas de exploración inalcanzables para el hombre, como por ejemplo en cavernas estrechas, zonas contaminadas, o grandes profundidades, etc.

Otras de las aplicaciones de este tipo de vehículos son las militares, ya que son desarrollados específicamente para ejecutar una misión dada como reconocimiento, inserción y eliminación de minas.

Otros vehículos acuáticos realizan operaciones de mantenimiento, inspección, exploración de ductos submarinos, estructuras submarinas, torres petroleras, algunos hábitats, etc.

## **1.3 Objetivos generales y específicos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar un prototipo de vehículo acuático sumergible con sistema de estabilización capaz de realizar las funciones principales de un submarino.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Buscar información sobre vehículos sumergibles
- Diseñar los modelos eléctricos y de software para el prototipo
- Implementar físicamente los diseños mecánicos, eléctricos y de software
- Experimentar el funcionamiento del prototipo en ambientes controlados.
- Escribir y mostrar los resultados obtenidos en gráficas y tablas.

### 1.4 Hipótesis

Se puede construir un vehículo sumergible con tubos de PVC, motores eléctricos, giroscopio y batería.

### 1.5 Alcances y limitaciones

#### 1.5.1 Alcances

En el presente trabajo se diseñó e implementó un prototipo de vehículo sumergible operado mediante un algoritmo de flujo. Se realizaron pruebas de funcionamiento para el sistema de inserción-emersión, se implementó la estructura física del prototipo, se probó el sistema de estabilización y finalmente se realizaron pruebas en conjunto dentro un ambiente controlado.

Se expuso parte del desarrollo de esta investigación en el Congreso Nacional de Ciencias de la Computación CONACIC 2017 y CONACIC 2018, se está trabajando en el proceso de patente ante el Instituto Mexicano de Propiedad Intelectual (IMPI) dentro de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y se está trabajando en un artículo de investigación científica.

#### 1.5.2 Limitaciones

El prototipo no cuenta con un control inalámbrico, carece de sensores que le permite realizar movimientos autónomos, no puede sumergirse a más

de 4 metros, no cuenta con un sistema en tiempo real para captura y transmisión de imágenes o video.

## **1.6 Justificación**

Se propone contribuir al desarrollo tecnológico científico en rubro de la robótica acuática, ya que en México son pocos los trabajos que se han realizado hasta ahora.

Este trabajo se enfoca al diseño e implementación de un vehículo acuático sumergible, donde se ha tomado en cuenta las etapas del diseño mecánico, electrónico y de software. Estos diseños se han implementado y probado en un ambiente controlado.

Los beneficios de desarrollar este tipo de tecnología son: contribuir al desarrollo tecnológico y científico del país, generar una línea de investigación que ataque los problemas de diseño e implementación de vehículos acuáticos sumergibles.

Con el desarrollo de este trabajo se abordarán diversos problemas que se dividirán en el diseño e implementación de cada una de las partes que componen un vehículo acuático sumergible.

## **1.7 Organización de la tesis**

La tesis se encuentra organizada en 5 capítulos. En el capítulo 1 se presentan los antecedentes y una introducción al problema, así como los alcances y limitaciones. En el capítulo 2 se presenta el marco teórico con clasificación, aplicaciones y algunos componentes de vehículos sumergibles. En el capítulo 3 se describe el diseño y la construcción de un prototipo final, con desempeño aceptable para cubrir los requerimientos de la tesis. En el capítulo 4 se presenta los experimentos y pruebas realizadas con el prototipo final desarrollado en la presente tesis, indicando los comportamientos

básicos en ambientes controlados. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las aportaciones y conclusiones.

## **CAPÍTULO 2. Marco teórico**

### **2.1 Principio de Arquímedes**

El empuje que reciben los cuerpos al ser introducidos en un líquido, fue estudiado por el griego Arquímedes, y su principio se expresa como:

“Todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido (líquido o gas) recibe un empuje ascendente, igual al peso del fluido desalojado por el objeto” [18].

Algunas de las aplicaciones del principio de Arquímedes son: la flotación de los barcos, la flotación de los submarinos, los salvavidas, los densímetros, los globos aerostáticos, los flotadores de las cajas de los inodoros y en los peces.

Los barcos flotan porque su parte sumergida desaloja un volumen de agua cuyo peso es mayor que el peso del barco. Los materiales con los que está construido un barco son más densos que el agua. Pero como el barco está hueco por dentro, contiene una gran cantidad de aire. Debido a ello la densidad promedio del barco es menor que la del agua.

Debido a que, para que un objeto flote, la fuerza de flotación sobre el cuerpo debe ser igual al peso del fluido desplazado, los fluidos más densos ejercen una fuerza de empuje más grande que los menos densos. Por lo anterior, un barco flota más alto en agua salada que en agua dulce ya que la primera es ligeramente menos densa.

Para un submarino es más fácil variar su peso que su volumen para lograr la densidad deseada. Para ello se deja entrar o salir agua de los tanques de lastre. De manera semejante, un cocodrilo aumenta su densidad promedio cuando traga piedras. Debido al aumento de su densidad (por las

piedras tragadas), el cocodrilo puede sumergirse más bajo el agua y se expone menos a su presa.

Para que una persona flote en el agua con más facilidad, debe reducir su densidad. Para efectuar lo anterior la persona se coloca un chaleco salvavidas, provocando con ello aumentar su volumen mientras que su peso aumenta muy poco, por lo cual, su densidad se reduce.

Un pez normalmente tiene la misma densidad que el agua y puede regularla al extender o comprimir el volumen de una bolsa con la que cuenta. Los peces pueden moverse hacia arriba al aumentar su volumen (lo que disminuye su densidad) y para bajar lo reducen (lo que aumenta su densidad) [19].

## **2.2 Presión Hidrostática**

Es aquella presión que ejerce un líquido o fluido que se encuentra en reposo. Es una presión natural, que el líquido ejerce de manera propia, sin que sea necesario que se aplique una fuerza o movimiento. Cabe mencionar que todos los fluidos ejercen presión hidrostática. No existe ningún fluido que no lo haga. Es una fuerza natural e inevitable, al igual que la gravedad.

Desde un punto de vista práctico, se dice que se trata de la presión que ejerce un fluido sobre las paredes del fondo del recipiente que lo contiene. Igualmente, es la misma presión que ejerce sobre todo objeto sumergido en dicho fluido. Siempre una fuerza perpendicular a las paredes del recipiente y de manera descendente al cuerpo o la superficie del objeto sumergido. Se dice que deja de ser una fuerza perpendicular si el fluido empieza a estar en movimiento [20].

## **2.3 Fuerza de empuje**

Es la fuerza vertical y ascendente que recibe un cuerpo total o parcialmente sumergido en un líquido.

La fuerza de empuje depende principalmente al volumen del objeto sumergido y de la profundidad en que éste se encuentre [21].

## **2.4 Exploración submarina**

El océano se ha estado observando desde épocas muy remotas. La curiosidad y necesidad de entender el océano ha cambiado a través de la historia. En épocas primitivas el océano era la fuente principal de pesca, razón por la cual la mayoría de los asentamientos poblacionales se dieron cercanos a las zonas costeras, con el fin de conquistar y explorar nuevos horizontes.

Con el paso de los tiempos la navegación y exploración de los océanos ha ido cambiando de acuerdo al avance tecnológico, algunos de los instrumentos más utilizados para la exploración submarina son los siguientes [22]:

- **Sensores Remotos (Satélites):** miden la superficie del mar. La ventaja de este método es la cobertura de los océanos y la facilidad de acceder a regiones remotas del océano. Una de las desventajas de los satélites es que solo pueden observar la superficie del océano, pero no son tan eficientes en medir las propiedades de la columna de agua.
- **Flotadores:** los flotadores se mueven libremente con la corriente del océano, de manera que sus posiciones en cualquier momento son controladas de manera muy limitada. Son utilizados en regiones alejadas de la costa donde es difícil y costoso colocarles un anclaje. También son comúnmente utilizados para medir corrientes en zonas costeras en donde las barreras físicas y las zonas someras no permiten el uso de otra

instrumentación. Algunos flotadores subsuperficiales modernos permanecen hundidos por varias semanas y salen brevemente a la superficie a transmitir sus datos a un satélite para luego regresar a su profundidad asignada. Por lo tanto, estos flotadores se pueden programar para estudiar cualquier profundidad designada y también pueden medir datos de temperatura y salinidad durante su ascenso a la superficie.

- Instrumentos sumergibles (submarinos): pueden ser tripulados, controlados remotamente y/o autónomos. Los sumergibles tripulados se utilizan en el área de la geología y biología marina mayormente para la exploración del fondo marino y para el estudio de los diferentes ecosistemas marinos. Los robots submarinos operados remotamente (ROVs, por las siglas en inglés de Remotely Operated Vehicle) se utilizan para explorar zonas remotas o inaccesibles. Estos instrumentos pueden a su vez recolectar muestras del fondo marino, fotografiar, y/o tomar videos a profundidades mayores

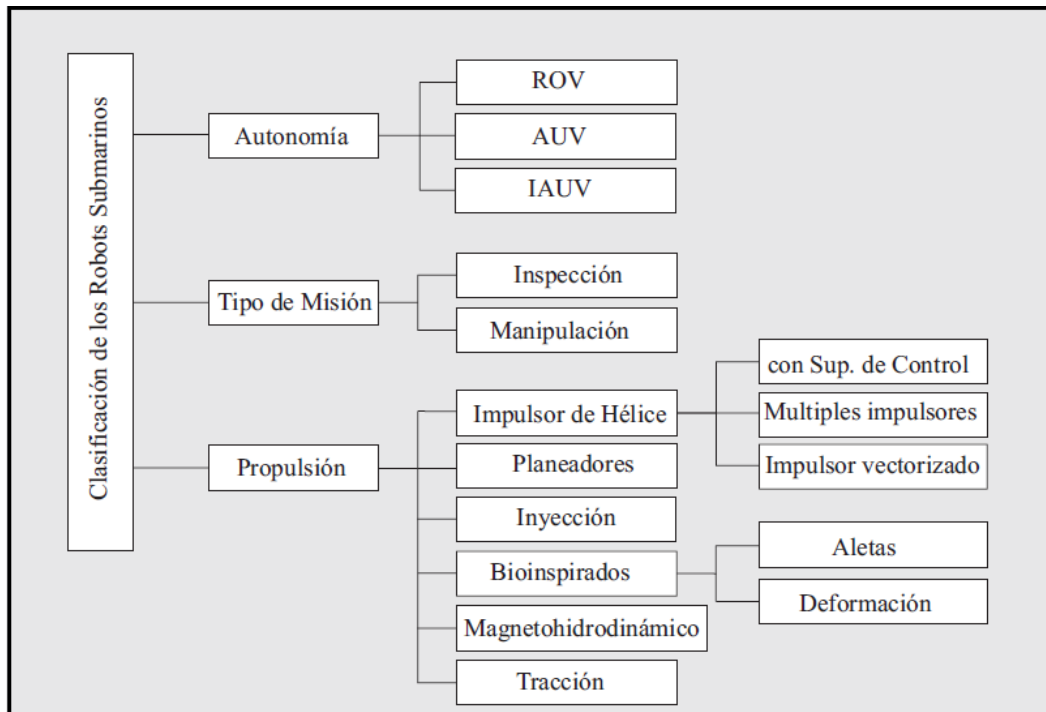
## **2.5 Clasificación de vehículos sumergibles**

Los vehículos sumergibles se pueden clasificar por su nivel de autonomía, el tipo de misión a realizar y su sistema de propulsión. En la figura 4 se presenta una clasificación de los vehículos sumergibles.

La principal manera de clasificarlos es de acuerdo a su nivel de autonomía. Existen vehículos sumergibles completamente autónomos y otros que deben ser controlados continuamente por un operador. Por otro lado, están los que pueden considerarse actualmente en un nivel intermedio de autonomía, ya que los prototipos desarrollados hasta ahora requieren de un control supervisado o de un operador que realice la tarea de razonamiento para determinar las acciones que se deben llevar a cabo para completar la misión. No obstante, el objetivo final de estos robots es que lleguen a ser

completamente autónomos y solo sea el operador quien al inicio defina la misión a realizar mediante comandos de alto nivel.

Por otro lado, estos vehículos sumergibles se pueden clasificar por el tipo de misión a realizar. Las misiones pueden ser de inspección (observación) o de manipulación (intervención). La principal diferencia entre un vehículo sumergible diseñado para realizar intervenciones y otro que solo realiza inspecciones, es que el primero debe poseer herramientas o un brazo robótico. La misión para la que está diseñado un vehículo sumergible definirá el tipo de sensores, actuadores y estructura que deberá poseer [23].



**Figura 4.** Clasificación de los Robots Submarinos

### 2.5.1 Submarinos Operados Remotamente, ROVs

Los robots submarinos operados remotamente están conectados a la superficie mediante un cordón umbilical (un conjunto de cables unidos), que permite el intercambio de datos y la alimentación de energía al robot. A través de una interfaz del ordenador situado en la superficie, el usuario define

los comandos que el robot deberá ejecutar. A su vez el ROV envía las señales de sus sensores (presión, temperatura, imágenes, etc.) al ordenador en superficie, para que el usuario conozca el estado del robot y el ambiente que lo rodea.

Actualmente a las instalaciones petroleras o de gas se les presta servicio mediante ROVs. Las exigencias del trabajo realizado en estructuras submarinas son altas, ya que requieren de inspección frecuente e intervención para realizar las operaciones de perforación, manipular válvulas, reparar o reemplazar componentes submarinos, y realizar una variedad de tareas requeridas para mantener el ritmo de producción y la calidad del producto. La tendencia en el uso de ROVs aumentara a medida que la producción de gas y petróleo en instalaciones cerca de la costa se traslade hacia aguas profundas.

Cuando las tareas se realizan a grandes profundidades, las fuerzas de arrastre que se ejercen sobre la superficie del cable son mayores. Esto hace que el vehículo sea menos manejable.

Aunque los cables han aumentado su diámetro (debido a los mayores requerimientos de energía), el aumento de la superficie de incidencia de las fuerzas de arrastre es producto, en gran medida, de la extensa longitud de los mismos. No obstante, se han presentado algunas soluciones como construir un Sistema de Manejo de Cable (TMS, por las siglas en inglés de Tether Management System) que se ancla en el fondo marino y soporta las fuerzas de arrastre del cable de mayor distancia (el que va desde la embarcación en la superficie al TMS) y a la vez permite que el ROV navegue con más facilidad.

### 2.5.2 Submarinos Autónomos, AUVs

Los robots submarinos autónomos (AUVs, por las siglas en inglés de Autonomous Underwater Vehicle) poseen una arquitectura de control que les

permite realizar misiones sin la supervisión de un operador. Además, contienen su propia fuente de energía basada en baterías recargables.

Por lo general no hay una línea de comunicación entre el vehículo y la superficie, ya que se le suele programar con tareas y misiones predefinidas. No obstante, cuando se requiere un intercambio de información con la superficie, la comunicación se puede realizar a través de dispositivos acústicos.

Estos robots pueden resolver las limitaciones impuestas por los cables de los ROVs para algunas tareas. Los AUVs se utilizan actualmente para tareas de exploración científica, muestreo oceanográfico, arqueología submarina y exploración debajo del hielo. Los datos que recopila el vehículo se almacenan en su memoria interna para luego ser analizados. Por otro lado, también se han utilizado para operaciones militares como por ejemplo la detección de minas, y se están desarrollando aplicaciones más elaboradas como lo son vigilancia submarina.

### 2.5.3 Submarinos Autónomos para Intervenciones, IAUVs

Los AUVs han sido diseñados para realizar misiones de observación, sin embargo, recientemente se ha generado un interés en que estos puedan realizar tareas de manipulación. Esta es la idea detrás de los robots submarinos autónomos para intervención (IAUVs, por sus siglas en inglés). Con este tipo de robots las misiones serían más económicas que en el caso de los ROVs, además su maniobrabilidad sería superior ya que el IAUV estaría libre de las restricciones que impone el cordón umbilical. Ejemplos de desarrollos de este tipo de robots son los proyectos ALIVE [24], SAUVIM [25] y RAUVI [26]. El vehículo ALIVE navega autónomamente hasta el lugar donde se realizar la intervención, una vez que llega a la posición deseada, cambia su operación a Control Supervisado y, mediante comunicación acústica, realiza las tareas de manipulación. Por su parte, el robot GIRONA

500 (del proyecto RAUVI) explora primero la región de interés y toma información acústica y visual del fondo.

Posteriormente el robot sube a la superficie donde la información recolectada es procesada para realizar una reconstrucción de la región explorada. A través de una interfaz gráfica de usuario un operador identifica el objeto de interés y da los comandos al robot para que realice la intervención. Hasta el momento se han realizado exitosamente pruebas experimentales en un escenario en el que la misión del robot era recuperar una caja negra de avión.

## **2.6 Componentes de los submarinos**

### **2.6.1 Cabina**

La cabina o casco consiste en la estructura y el material que reviste al robot submarino. En la cabina están montados y/o contenidos, el ordenador abordo, el equipo eléctrico y electrónico (motores eléctricos, controladores, convertidores de señales, sensores, tarjetas electrónicas, etc.), y los elementos mecánicos del robot (como lo son el sistema de lastre, las aletas y los impulsores).

Los factores que determinan el diseño de una cabina son: la profundidad a la que va operar (y por lo tanto la presión hidrostática que va a soportar); los niveles de temperatura que va resistir; la resistencia a la corrosión; el volumen de los elementos que contendrá; la facilidad para ensamblar/desensamblar; la factibilidad de su construcción y el costo.

Otro factor que se debe considerar son las fuerzas de arrastre que se generan por el movimiento del robot. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad del robot. Cuando el robot se mueve a velocidad constante, la fuerza generada por el impulsor es igual a las fuerzas de arrastre.

A menores fuerzas de arrastre menor es la energía consumida durante la navegación del robot. Las fuerzas de arrastre dependen en gran medida de la geometría de la cabina.

Otro aspecto importante del diseño de la cabina es el tipo de material. En [27] se presenta una discusión sobre los diferentes tipos de materiales mayormente utilizados en la construcción de robots submarinos. Estos materiales son principalmente metálicos, compuestos y plásticos. En la tabla 1 se presentan las propiedades de algunos materiales utilizados en la construcción de cabinas.

**Tabla 1.** Propiedades del material

<b>Material</b>	<b>Densidad (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia a la fluencia (MPa)</b>	<b>Modulo de tensión (GPa)</b>	<b>Resistencia Específica (kNm/kg)</b>
Acero alta resistencia (HY80)	7.86	550	207	70
Aleación de Aluminio (7075)	2.9	503	70	173
Aleación de Titanio (6-4 STOA)	4.5	830	120	184
CFRP (Epoxy/S-Iass)	2.1	1200	65	571
GFRP (Epoxy/HS)	1.7	1200	210	706
Acrílico	1.2	103	3.1	86
PVC	1.4	48	35	34

### 2.6.2 Sistemas de propulsión

El sistema de propulsión de un vehículo sumergible define completamente los tipos de movimientos y maniobras que este puede realizar. Los sistemas de propulsión también tienen implicaciones en el consumo de energía, el hardware del vehículo y el efecto que el vehículo genera en el ambiente marino. Los principales sistemas de propulsión son: Impulsores de Hélice, Planeadores Acuáticos (basados en Sistemas de Lastre y Aletas), y bioinspirados. A pesar de que la mayoría de los sistemas de propulsión de robots submarinos consisten de impulsores de hélice, aletas

móviles para el guiado, y sistemas de lastre para realizar las operaciones de viraje, se han propuesto diferentes formas de generar movimiento dentro del agua, a continuación, se describen algunas de estas.

- Impulsores de Hélice: El sistema de empuje con hélice y motor es el más utilizado en la mayoría de robots submarinos. Consiste generalmente en un motor eléctrico, al que se le acopla una hélice. Al girar la hélice produce un efecto de empuje al desplazar el fluido de adelante hacia atrás, debido a la diferencia de presión producida.
- Planeador Acuático: Los robots submarinos planeadores no disponen de impulsor de hélice. Estos han sido diseñados para deslizarse desde la superficie del mar hasta una profundidad programada, luego cambian su flotabilidad y cabeceo para ir en dirección ascendente hasta llegar a un punto prefijado donde vuelven a descender y así sucesivamente.
- Bioinspirados: Este tipo de sistema de propulsión está inspirado en la fisiología de los peces o los cetáceos, y con ello su forma de desplazarse en el agua. El sistema más simple consiste en una aleta con un grado de libertad colocada vertical u horizontalmente en la parte trasera del vehículo submarino. Su movimiento cíclico perpendicular al plano de las aletas, produce ondas de agua que impulsan el vehículo hacia adelante. Este movimiento produce empuje en un solo sentido.
- Inyección: La propulsión por inyección consiste en recoger agua del exterior para luego almacenarla en un depósito y finalmente expulsarla mediante una bomba, inyectándola al medio acuático a través de una boquilla. El agua es forzada a salir a alta presión por la boquilla y la fuerza de empuje del agua produce una aceleración en el vehículo.
- Impulsor Magnetohidrodinámico: El principio de funcionamiento de los impulsores magnetohidrodinámicos consiste en hacer circular corriente eléctrica por un fluido conductor el cual es atravesado por un campo magnético. El impulsor genera el movimiento del fluido debido a la

interacción del campo magnético y la corriente que circula a través de él. La ventaja que presenta este tipo de sistema de propulsión es que no tiene partes móviles, y por tanto será más fácil resolver problemas de estanqueidad y mantenimiento. Sin embargo, la desventaja que presenta es que los electrodos reducen notablemente el rendimiento electromecánico, debido a su disolución y al desprendimiento de gases causados por la electrólisis de los materiales afectados.

### 2.6.3 Sistema de emersión e inmersión

Todos los barcos, así como los submarinos en superficie, están en situación de flotación positiva, pesando menos que el volumen equivalente de agua desplazada (de acuerdo con el principio de Arquímedes). Para sumergirse hidrostáticamente (sin ayuda mecánica), un buque debe ganar flotación neutral (peso igual a empuje), incrementando su propio peso o disminuyendo el desplazamiento de agua (volumen). Para controlar su peso, los submarinos están equipados con tanques de lastre, que pueden llenarse con agua tomada del exterior o aire a presión.

Para sumergirse o emerger, los submarinos usan tanques los cuales se abren y se llenan completamente de agua para sumergirse o se llenan de aire a presión para emerger. Durante la inmersión, los tanques principales suelen permanecer inundados, lo que simplifica su diseño, por lo que en muchos submarinos estos tanques son simplemente una sección del espacio entre los cascos. Para un control manual más rápido y preciso de la profundidad, los submarinos disponen de unos tanques de control de profundidad más pequeños, capaces de soportar presiones más altas. La cantidad de agua en estos tanques puede controlarse tanto para responder a cambios en las condiciones exteriores como para cambiar la profundidad de inmersión. Dichos tanques pueden situarse cerca del centro de gravedad del submarino, o distribuirse por el buque para evitar afectar la estabilidad del submarino.

#### 2.6.4 Fuente de energía

La fuente de energía es uno de los componentes más críticos en un robot submarino, principalmente en los AUVs. El tipo de fuente de energía define el tiempo de operación del robot, además del volumen y peso del vehículo.

### 2.7 Sistema embebido

Los sistemas embebidos o empotrados, es un sistema de computación fruto de la combinación de hardware y software, diseñado para realizar una o algunas funciones dedicadas frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real. Al contrario de lo que ocurre con los ordenadores de propósito general (como por ejemplo una computadora personal o PC) que están diseñados para cubrir un amplio rango de necesidades, los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas. En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base (la tarjeta de vídeo, audio, módem, etc.) y muchas veces los dispositivos resultantes no tienen el aspecto de lo que se suele asociar a una computadora [28].

En la figura 5 se muestran algunas características con la que cuenta la Raspberry Pi 4.

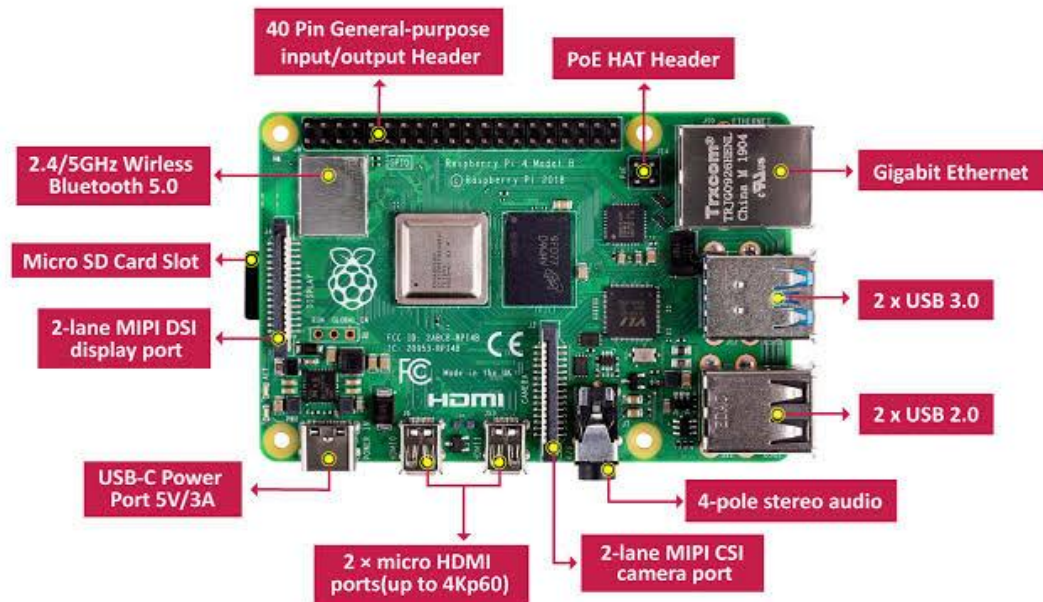


Figura 5. Raspberry Pi 4

## 2.8 Acelerómetro y Giroscopio (MPU6050)

EL MPU6050 es una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units) de 6 grados de libertad (Figura 6). Este sensor es muy utilizado en navegación, goniometría, estabilización, etc.

El MPU6050 tiene integrado un giroscopio de 3 ejes, un acelerómetro de 3 ejes, y un procesador digital de movimiento motor acelerador de hardware con un puerto I2C auxiliar que se conecta a las interfaces de sensores digitales de terceras partes tales como magnetómetros.

Este componente combina la aceleración y el movimiento de rotación más la información de rumbo en un único flujo de datos para la aplicación. Esta integración presenta un diseño más compacto y tiene ventajas de costos inherentes en comparación con soluciones discretas de giroscopio más acelerómetro. El MPU6050 también está diseñado para interactuar con

múltiples sensores digitales no inerciales, tales como sensores de presión, en su bus I2C auxiliar maestro.

Así pues, el sensor MPU6050 es una pequeña pieza tecnológica de procesamiento de movimiento. El cual mediante la combinación de un MEMS (Sistemas Microelectromecánicos) giroscopio de 3 ejes y un MEMS acelerómetro de 3 ejes en la misma pastilla de silicio junto con un DMP (Movimiento Digital Processor), es capaz de procesar los algoritmos de movimientos complejos de 9 ejes en una placa [29].



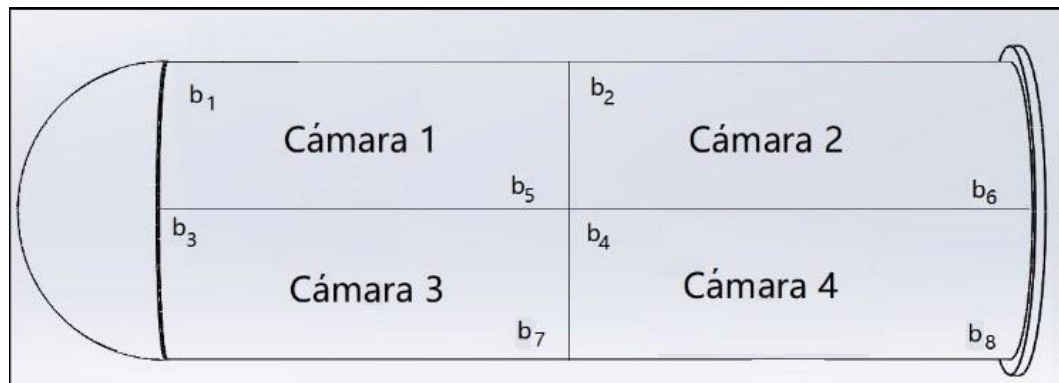
**Figura 6.** MPU6050.

## Capítulo 3: Desarrollo del prototipo

### 3.1 Sistema de Inmersión-Emersión y Estabilización (SIE).

En el presente trabajo se propone una metodología de inmersión-emersión fundamentada en el sistema de lastre de los submarinos. En dicho sistema se varía la masa mediante el llenado o vaciado del agua en las cámaras de lastre aumentando el peso, con la finalidad de manipular los movimientos de inmersión-emersión.

El diseño estructural del SIE está conformado por 4 cámaras de lastre, las cuales contienen una bomba para llenado ( $b_1, b_2, b_3, b_4$ ) y una bomba para vaciado ( $b_5, b_6, b_7, b_8$ ) del agua (figura 7).



**Figura 7.** Diseño estructural del casco del submarino.

El algoritmo de control retroalimentado del SIE está representado mediante un diagrama de rutinas secuenciales (Figura 8). El algoritmo comienza recibiendo una señal la cual es comparada, si la señal es igual a  $i$  (inmersión), se activan al mismo tiempo las bombas de llenado  $b_1, b_2, b_3, b_4$ , este proceso tiene una duración de diez segundos (tiempo necesario para que el casco este sumergido completamente gracias al aumento de su masa), al término de este tiempo las bombas son apagadas para dar inicio al sistema de estabilización.

El sistema de estabilización trabaja con la información proporcionada por el acelerómetro. Su trabajo consiste en verificar que los ángulos de inclinación estén dentro de los intervalos  $(-5^\circ > x < 5^\circ)$  y  $(-5^\circ > y < 5^\circ)$  correspondientes a los movimientos longitudinales ( $x$ ) y transversales ( $y$ ). Cuando el ángulo longitudinal sea mayor a  $-5^\circ$  se activan las bombas  $b_1$  y  $b_2$ , en caso contrario se activan  $b_3$  y  $b_4$ . Para los movimientos transversales si el ángulo de inclinación es mayor a  $-5^\circ$  se activan las bombas  $b_1$  y  $b_3$ , en caso contrario se activan  $b_2$  y  $b_4$ .

Una vez terminadas las comparaciones, el lazo de retroalimentación vuelve a verificar la señal de entrada  $a$ . Si  $a$  es distinta de  $i$ , se inicia el proceso de emersión, en el cual se activan las bombas de vaciado ( $b_5, b_6, b_7, b_8$ ) durante 10 segundos (tiempo requerido para expulsar el agua introducida durante el proceso de inmersión) para reducir su masa, lográndose la emersión del casco.

Al terminar los diez segundos, inicia el sistema de estabilización, el cual verifica la condición: cuando el ángulo longitudinal está fuera de los rangos establecidos, activa  $b_7$  y  $b_8$ , en caso contrario activa  $b_5$  y  $b_6$ . Para el caso de los movimientos transversales se activan ( $b_6$  y  $b_8$ ) o ( $b_5$  y  $b_7$ ) según sea el caso.

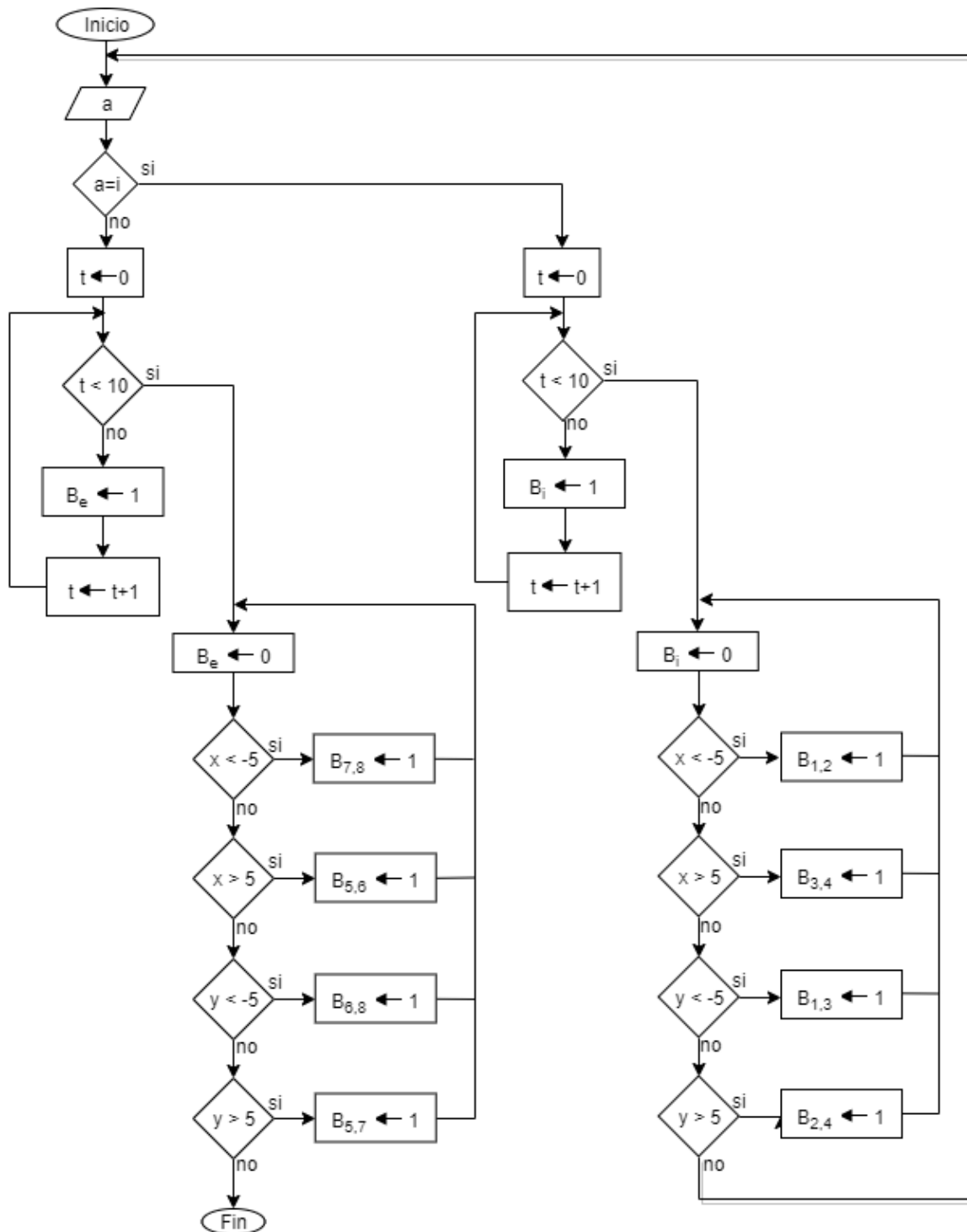


Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo de control retroalimentado.

En la figura 9 se muestra el código en Python del SIE, el cual fue implementado en base al diagrama de flujo de la figura 8.

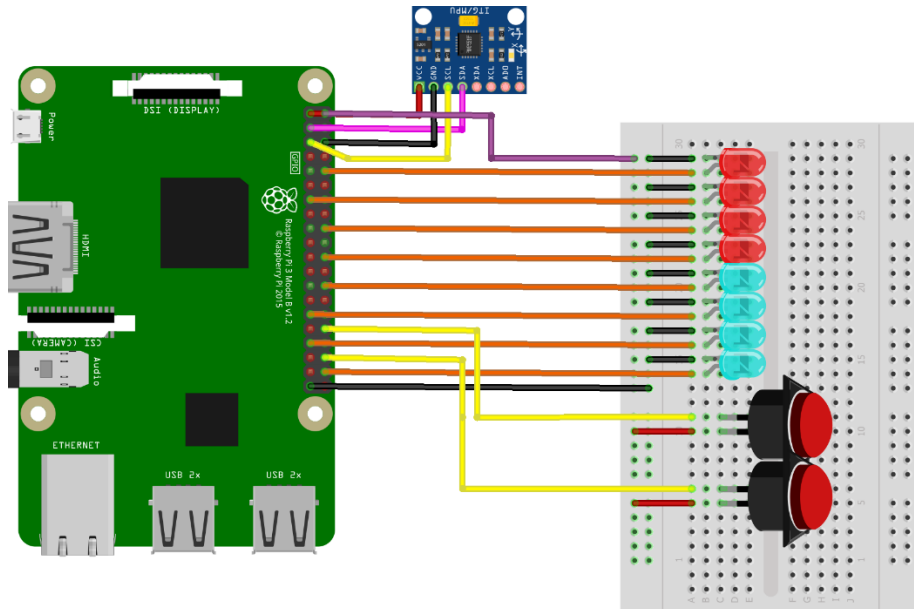
```

1  #!/usr/bin/python
2  import smbus
3  import math
4
5  # Register
6  power_mgmt_1 = 0x6b
7  power_mgmt_2 = 0x6c
8
9  def read_byte(reg):
10     return bus.read_byte_data(address, reg)
11
12  def read_word(reg):
13     h = bus.read_byte_data(address, reg)
14     l = bus.read_byte_data(address, reg+1)
15     value = (h << 8) + l
16     return value
17
18  def read_word_2c(reg):
19     val = read_word(reg)
20     if (val >= 0x8000):
21         return -((65535 - val) + 1)
22     else:
23         return val
24
25  def dist(a,b):
26     return math.sqrt((a*a)+(b*b))
27
28  def get_y_rotation(x,y,z):
29     radians = math.atan2(x, dist(y,z))
30     return -math.degrees(radians)
31
32  def get_x_rotation(x,y,z):
33     radians = math.atan2(y, dist(x,z))
34     return math.degrees(radians)
35
36  bus = smbus.SMBus(1) # bus = smbus.SMBus(0) fuer Revision 1
37  address = 0x68      # via i2cdetect
38
39  # Aktivieren, um das Modul ansprechen zu koennen
40  bus.write_byte_data(address, power_mgmt_1, 0)
41
42  print "Gyroskop"
43  print "-----"
44
45  gyroskop_xout = read_word_2c(0x43)
46  gyroskop_yout = read_word_2c(0x45)
47  gyroskop_zout = read_word_2c(0x47)
48
49  print "gyroskop_xout: ", ("%5d" % gyroskop_xout), " skaliert: ", (gyroskop_xout / 131)
50  print "gyroskop_yout: ", ("%5d" % gyroskop_yout), " skaliert: ", (gyroskop_yout / 131)
51  print "gyroskop_zout: ", ("%5d" % gyroskop_zout), " skaliert: ", (gyroskop_zout / 131)
52
53  print
54  print "Beschleunigungssensor"
55  print "-----"
56
57  beschleunigung_xout = read_word_2c(0x3b)
58  beschleunigung_yout = read_word_2c(0x3d)
59  beschleunigung_zout = read_word_2c(0x3f)
60
61  beschleunigung_xout_skaliert = beschleunigung_xout / 16384.0
62  beschleunigung_yout_skaliert = beschleunigung_yout / 16384.0
63  beschleunigung_zout_skaliert = beschleunigung_zout / 16384.0
64
65  print "beschleunigung_xout: ", ("%6d" % beschleunigung_xout), " skaliert: ", beschleunigung_xout_skaliert
66  print "beschleunigung_yout: ", ("%6d" % beschleunigung_yout), " skaliert: ", beschleunigung_yout_skaliert
67  print "beschleunigung_zout: ", ("%6d" % beschleunigung_zout), " skaliert: ", beschleunigung_zout_skaliert
68
69  print "X Rotation: ", get_x_rotation(beschleunigung_xout_skaliert, beschleunigung_yout_skaliert, beschleunigung_zout_skaliert)
70  print "Y Rotation: ", get_y_rotation(beschleunigung_xout_skaliert, beschleunigung_yout_skaliert, beschleunigung_zout_skaliert)

```

Figura 9. Código Python del SIE.

En la figura 10 se muestran las conexiones del SIE, donde se puede apreciar el módulo MPU6050, leds rojos que representan las válvulas de inmersión y azules las bombas de emersión.



**Figura 10.** Conexiones del SIE. Inmersión emersión

### 3.2 Control de movimiento

Los movimientos de adelante, atrás, izquierda y derecha se realizaron con la adaptación de dos motores CC, con un torque de  $12 \text{ Kg/cm}$ , alimentados con 11 volts y corriente de 2200mAh; en la figura 11 se muestra el diagrama de flujo de los movimientos, como valor de entrada se tiene el movimiento del joystick para posteriormente realizar las acciones de acuerdo con la polarización de los motores.

En primera instancia se inicializan M1a (Positivo del motor izquierdo), M1b (Negativo del motor izquierdo), M2a (Positivo del motor derecho) y M2b (Negativo del motor derecho) en cero y espera el movimiento joystick para posteriormente realizar las comparaciones y acciones pertinentes.

Si el joystick se inclina hacia delante se activan M1a y M2a obteniendo que ambos motores se activen y que el prototipo avance hasta que el joystick regrese a su estado inicial. Si la inclinación fue hacia la izquierda se activa el motor derecho asignando 1 a M2a, en caso de que fuera derecho se activa M1a y por último si el joystick se inclina hacia atrás se activan M1b y M2b, provocando que los motores giren al sentido contrario.

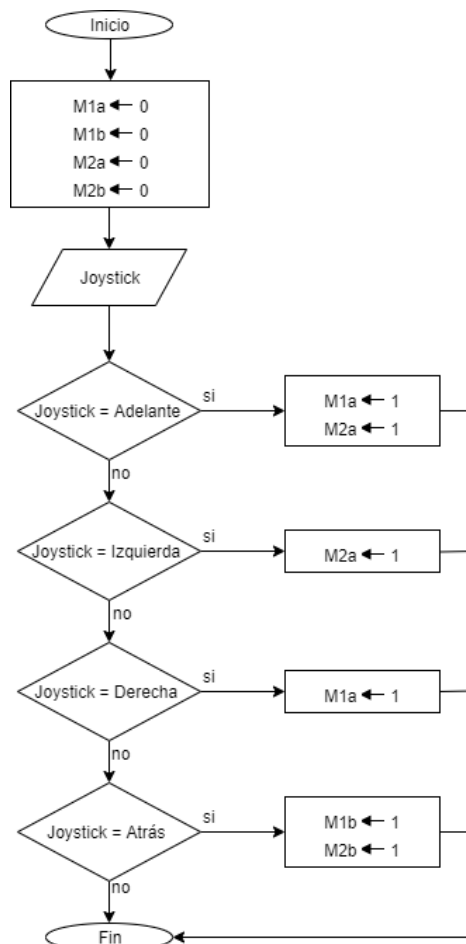
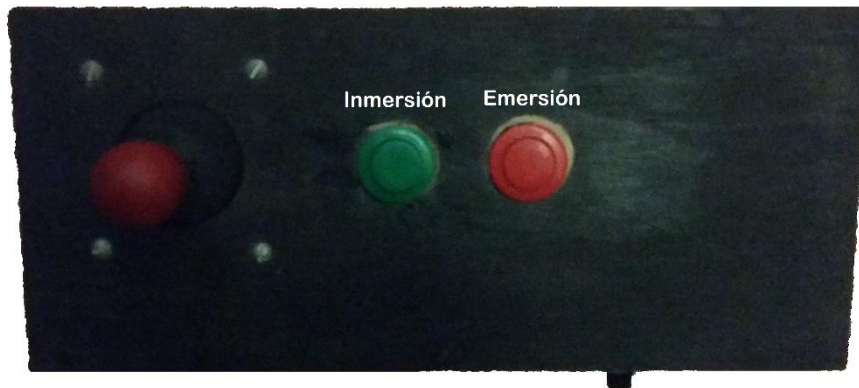


Figura 11. Diagrama de flujo de movimientos.

El control consta de una palanca joystick la cual realiza los movimientos de translación (adelante, atrás, izquierda y derecha) y dos botones, el botón verde es el encargado de inicial la inmersión cuando este se presione y el botón rojo es para el proceso de emersión (figura 12).



**Figura 12.** Tablero de control

### **3.3 Diseño de la estructura del prototipo**

De acuerdo a las recomendaciones presentadas en [30] los factores que se deben considerar para el diseño del casco son: la profundidad de operación (la presión hidrostática que soportará), los niveles de temperatura, resistencia a la corrosión, volumen de los elementos internos, facilidad para ensamblar/desensamblar, factibilidad de construcción, costo de materiales y considerar las fuerzas de arrastre que se generan por movimientos. Estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad del robot. Cuando el robot se mueve a velocidad constante, la fuerza generada por el impulsor es igual a las fuerzas de arrastre. Por lo tanto, a menores fuerzas de arrastre menor es la energía consumida durante la navegación del submarino. Las fuerzas de arrastre dependen en gran medida de la geometría del casco.

Para el diseño del vehículo acuático se recomienda una cabina con forma cilíndrica. Esto se debe a que (para un determinado volumen) las fuerzas de arrastre que se generan son pequeñas cuando se comparan con

otras geometrías. Por otro lado, esta forma geométrica es adecuada para resistir la presión hidrostática generada a grandes profundidades [31]. Además, la manufactura de una cabina con esta geometría es relativamente simple y esto a su vez tiene consecuencias favorables en el costo.

La presión hidrostática se define por la expresión

$$P_h = (\delta * g * h) \quad (1)$$

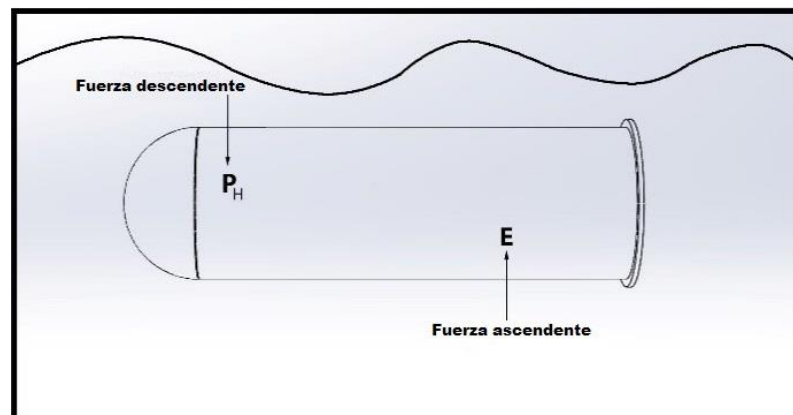
Donde  $\delta = 997 \text{ Kg}/\text{m}^3$  densidad del agua,  $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$  constante de aceleración de la gravedad y  $h$  la profundidad de trabajo. Sustituyendo los valores con una profundidad de 1.7m (alberca de pruebas) se obtiene la presión que recibe el casco  $16610.02 \text{ N}/\text{m}^2$

De acuerdo al principio de Arquímedes se establece que, “Todo cuerpo sumergido en un fluido recibe un empuje ascendente igual al peso del fluido desalojado” [32]. Esta fuerza recibe el nombre de empuje.

$$E = m \cdot g = (\delta \cdot g \cdot v) \quad (2)$$

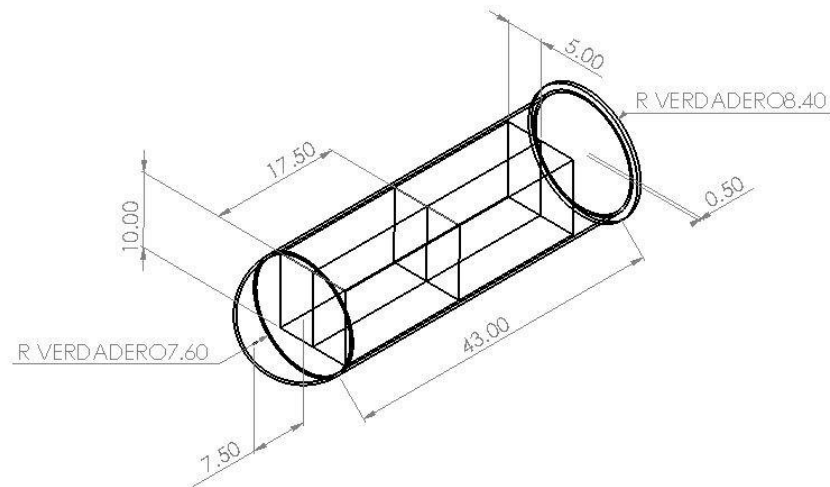
donde  $m = 6.99 \text{ kg}$  es la masa del casco.

En la figura 13 se muestran las fuerzas que afectan al casco sumergido en el agua.



**Figura 13.** Representación de las fuerzas que intervienen en el casco

El tamaño del casco y las cámaras de lastre se diseñaron con las medidas propuestas en la figura 14, donde se muestra el isométrico del casco y las cuatro cámaras de lastre con sus respectivas medidas.



**Figura 14.** Isométrico de cámara de lastre y casco

Basados en la expresión para el cálculo del volumen de un prisma rectangular.

$$v = A_b \cdot h \quad (3)$$

$$v = (a \cdot b) \cdot h \quad (4)$$

Se calculó el volumen de cada una de las cámaras siendo  $a$  y  $b$  los lados de la base y  $h$  la altura.

Al sustituir los valores correspondientes se obtuvo que el volumen de cada una de las cámaras de lastre es de  $0.000875 \text{ m}^3$  teniendo como capacidad de almacenamiento de  $0.875 \text{ lts}$  obteniendo  $3.5 \text{ kg}$  por todas las cámaras.

El volumen ( $v$ ) del fluido desplazado es equivalente al volumen del casco  $v_T$ . El  $v_T$  se ha calculado con

$$\sum (v_1, v_2, \dots, v_n) = v_T \quad (5)$$

Siendo  $v_1 = 0.007803m^3$  el volumen del cilindro

$$v_1 = (\pi \cdot r^2) \cdot h \quad (6)$$

El  $v_2$  corresponde al volumen de la semi esfera  $0.0009194 m^3$  calculado con la expresión.

$$v_2 = \frac{2}{3}\pi \cdot r^3 \quad (7)$$

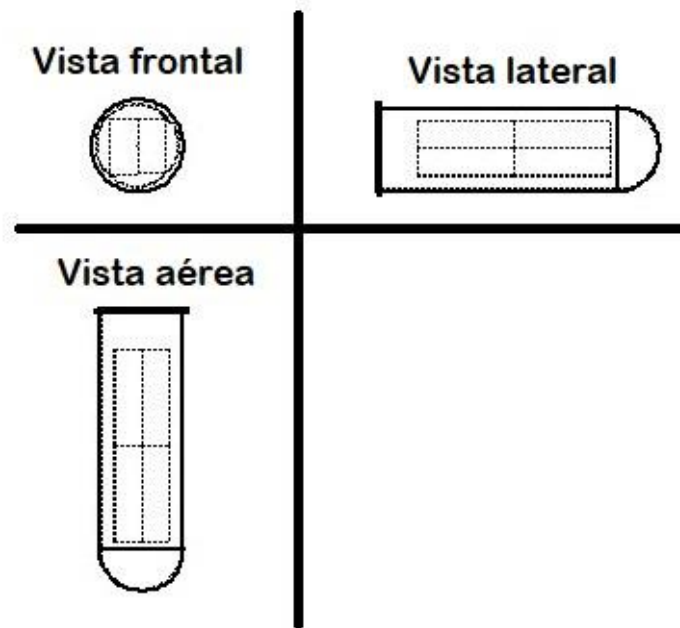
Realizando la sumatoria de  $v_1$  y  $v_2$  se obtuvo que  $v_T = 0.008722m^3$ .

De acuerdo al principio de Arquímedes la fuerza de empuje ( $E$ ) ascendente que recibe el casco es igual a  $85.2 N$

La presión total que ejerce el agua (fuerza de flotación  $F_{flotabilidad}$ ) al casco del vehículo sumergido se ha obtenido mediante la sumatoria de la fuerza de empuje  $E$  y la presión hidrostática  $P_H$ .

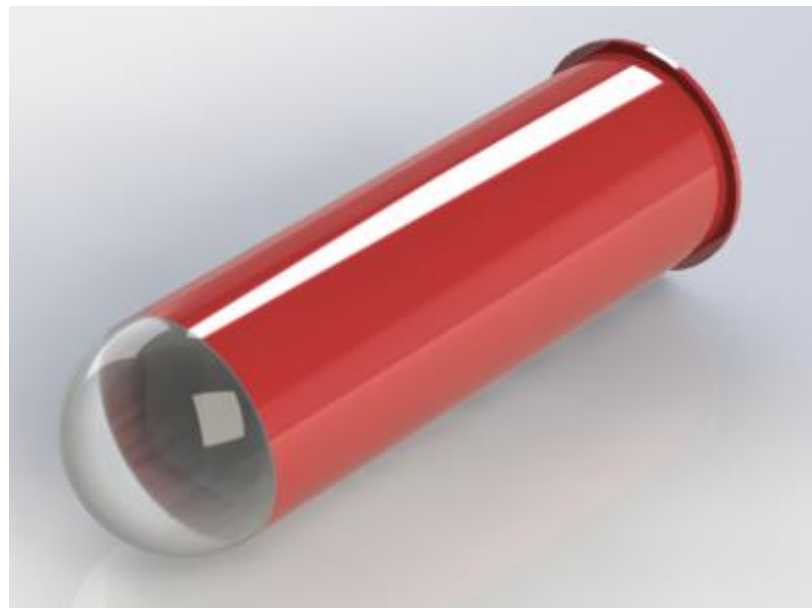
$$F_{flotabilidad} = E + (-P_H) \quad (8)$$

Las vistas frontal, lateral y aérea del casco se muestran en la figura 15.



**Figura 15.** Vistas del casco

El diseño texturizado fue realizado en un software CAD el cual se muestra en la figura 16, este sirvió como guía principal para la implementación física del prototipo.

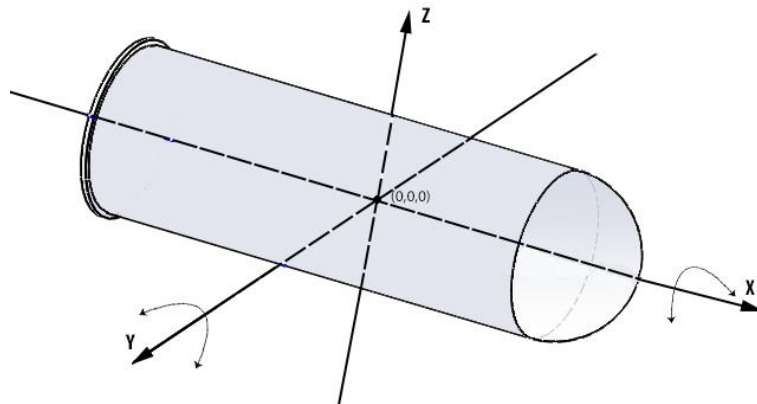


**Figura 16.** Diseño del casco.

La posición del centro de flotabilidad y gravedad se ubica en el origen (0,0,0), el cual se utiliza como referencia para controlar los movimientos longitudinales ( $x$ ) y transversales ( $y$ ) dentro de los intervalos que se presentan en la tabla 2, los ejes y ángulos de rotación se muestran en el diagrama de cuerpo libre en la figura 17.

**Tabla 2.** Intervalos de Control

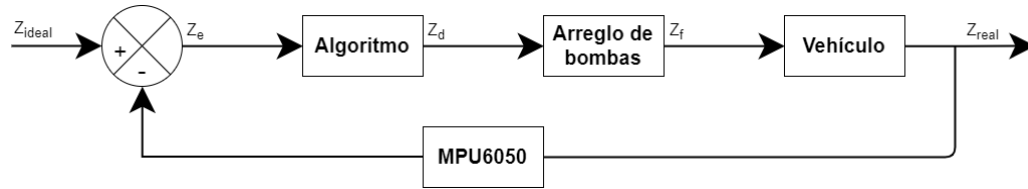
Eje	Movimiento	Valor inferior	Valor superior
X	Longitudinal	$-5^\circ$	$5^\circ$
Y	Transversal	$-5^\circ$	$5^\circ$



**Figura 17.** Diagrama de cuerpo libre.

El sistema de estabilización de lazo cerrado, controla los movimientos longitudinales y transversales donde se da la posición requerida  $z_{ideal}$  como referencia al sistema, el microcontrolador se encarga de tomar decisiones y en consecuencia enviar señales digitales a los actuadores, los cuales inciden en la posición del casco  $z_{real}$ . En el lazo de retroalimentación

la  $z_{real}$  es medida por el MPU6050 y enviada nuevamente al sistema para detectar errores y cerrar el proceso (Figura 18).



**Figura 18.** Diagrama a bloques del sistema de estabilización de lazo cerrado.

### 3.4 Implementación estructural del prototipo.

Tomando en cuenta las recomendaciones presentadas y al isométrico presentado anteriormente (Figura 14), el diseño estructural del prototipo se implementó en su mayoría con tubos de PVC debido a sus características termoplásticas, no se oxida ni se corroe y por su forma una cabina con forma cilíndrica, esto último se debe a que las fuerzas de arrastre que se generan son pequeñas cuando se comparan con otras geometrías. Por otro lado, esta forma geométrica es adecuada para resistir la presión hidrostática generada a grandes profundidades. Además, la manufactura de una cabina con esta geometría es relativamente simple y esto a su vez tiene consecuencias favorables en el costo.

Para el cuerpo del casco se utilizó un tubo de 43 cm de largo y 6 pulgadas de diámetro.

En la parte trasera del prototipo se colocó un copla de 6 pulgadas para unir la tapa con el tubo, cabe mencionar que la tapa se adecuó para que se pudiera abrir con facilidad (Figura 19).



**Figura 19.**Tapa trasera del prototipo ROV.

Todas las partes del casco se unieron con pegamento especial para PVC, en algunas zonas se realizaron mediante cera para depilar y tornillos en el caso de la manija, el resultado final de este proceso se muestra en la figura 20.



**Figura 20.**Casco del prototipo ROV.

Los motores fueron adaptados y cubiertos por una carcasa, la cual se imprimido en 3d para garantizar que no existieran filtraciones de agua hacia los motores (Figura 21).



**Figura 21.** Elice de prueba para el ROV.

Los motores se colocaron y se fijaron con tornillos los cuales fueron recubrirlos con cera y silicón para evitar filtraciones de agua, en la figura 22 se muestran los motores ensamblados en el casco.



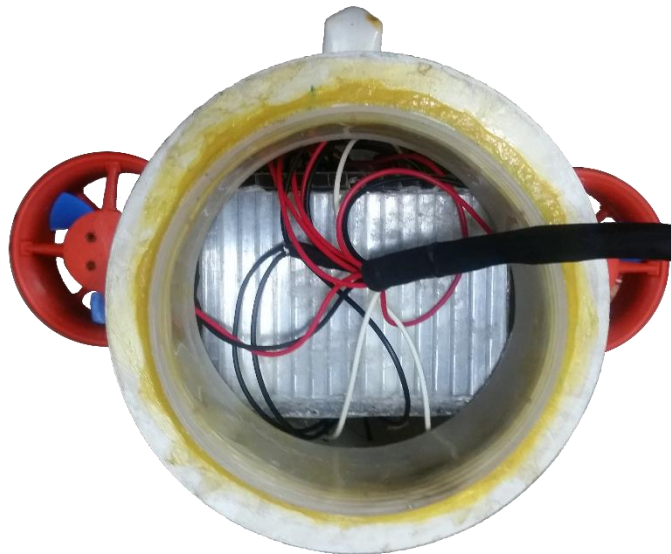
**Figura 22.** Montaje de motores.

Las cámaras de lastre se realizaron con policarbonato Cada cámara mide 10 cm de alto, 17.5 cm de largo y 5 cm de ancho, en la figura 23 se muestran todas las cámaras con su respectiva bomba, la cual se encarga de sacar el agua de la cámara que la almacena.



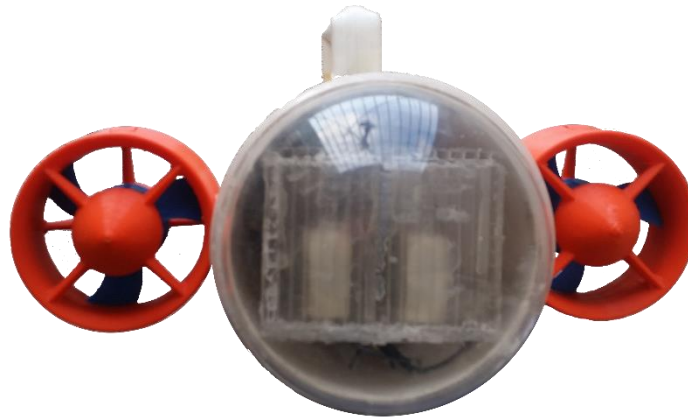
**Figura 23.** Cámaras de lastre

Después de tapar y sellar correctamente las cámaras de lastres, se colocó el módulo MPU6050 en la parte superior de las cámaras. En la figura 24 se muestra la colocación de las cámaras y el acelerómetro dentro del casco.



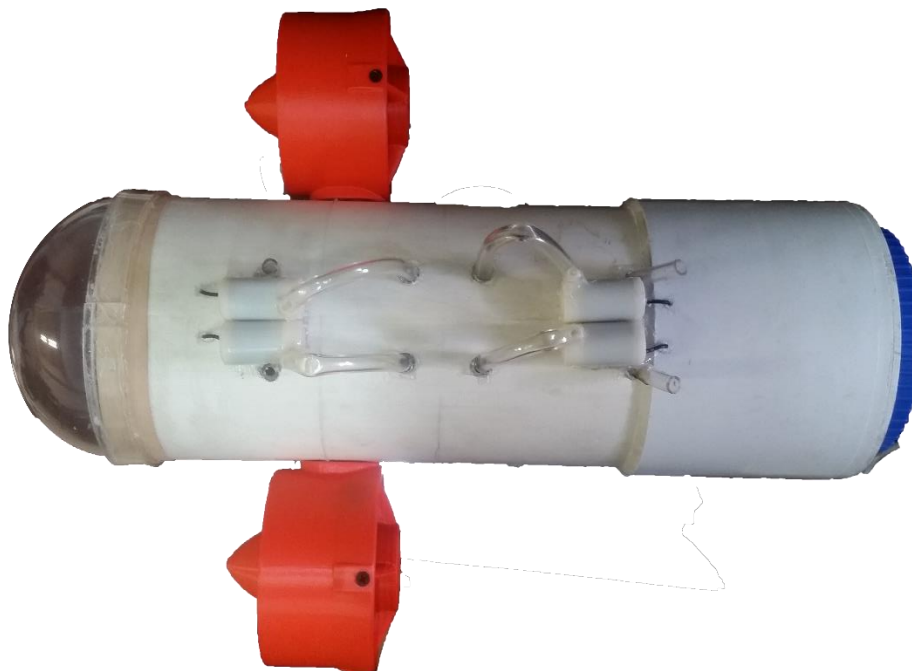
**Figura 24.** Montaje de las cámaras dentro del casco.

Para la parte de enfrente del casco, se elaboró una semiesfera acrílica transparente de 7.5 cm, esto para eliminar en su mayoría la fuerza de arrastre que se generaría si se utilizara una superficie plana (Figura 25).



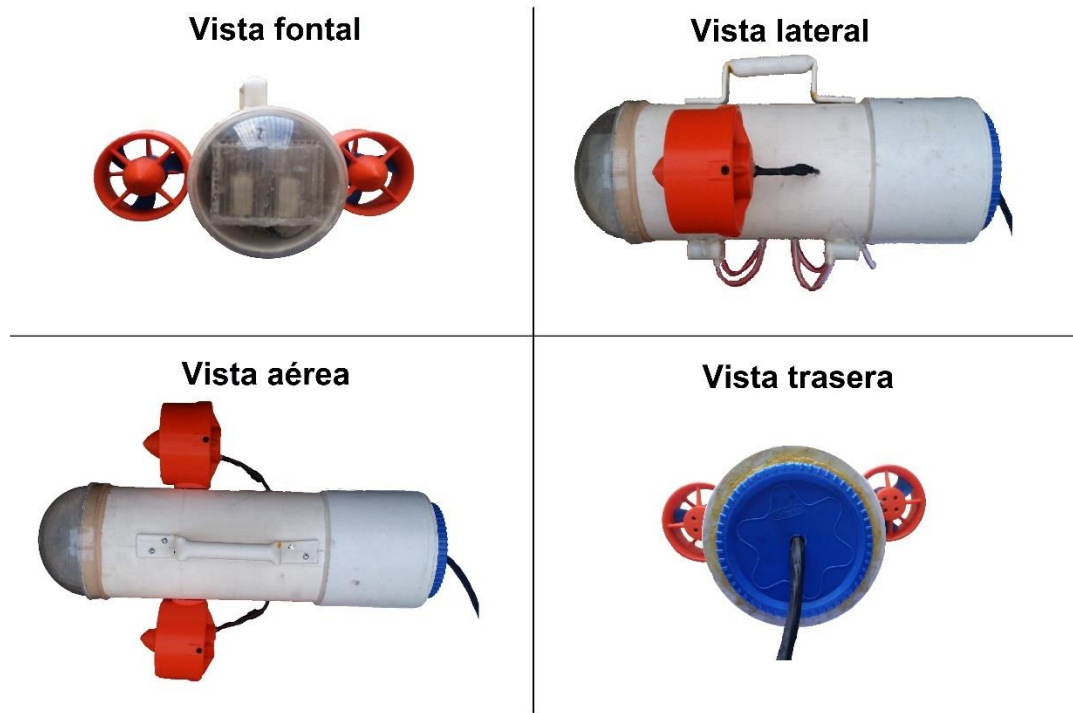
**Figura 25.** Semiesfera.

Las bombas encargadas de inundar las cámaras de lastre se colocaron abajo y afuera del casco, esto para que no existieran inconvenientes o dificultades a la hora de que estas jalaran el agua hacia adentro. En la figura 26 se muestran dichas bombas.



**Figura 26.** Bombas de llenado

El prototipo se alimentó con una fuente de voltaje de 11.1 v a 2.2 A de Polímero de Litio (LiPO). Las vistas finales del prototipo se muestran en la figura 27. Vista frontal, Vista lateral, vista aérea, vista trasera



**Figura 27.** Vistas del prototipo.

## Capítulo 4: Experimentos y resultados

### 4.1 Experimentos en ambiente controlado

El prototipo se construyó dentro del Laboratorio de Sistemas Robóticos (SIRO) de la FCC-BUAP. Los experimentos que a continuación se describen fueron realizados en un ambiente controlado (alberca con 1.7m de profundidad y temperatura de 20 a 30 grados).

**Experimento1:** El prototipo se sumergió en la alberca de pruebas para verificar el sellado de las cámaras de laste y el casco, con la finalidad de hallar posibles filtraciones de agua como se muestra en la Figura 28.



**Figura 28.** Prototipo sumergido en experimento 1.

**Experimento 2:** Se colocaron dentro del prototipo diferentes masas figura 29 (pesas de 1 kg, 0.5 kg y 0.3 kg), para verificar el principio de Arquímedes se comprobó que:

- Si la fuerza de empuje es mayor que el peso del casco esté flota.

- Si la fuerza de empuje es igual que el peso del objeto, el cuerpo está dentro del agua, pero no cubierto completamente (inmersión parcial).
- Si la fuerza de empuje es menor que el peso del casco este se hunde.



**Figura 29.** Masas para experimento 2.

**Experimento 3:** Consistió en colocar el prototipo en la superficie del agua para verificar su posición con respecto a los ejes (x, y) y se provocaron manualmente los movimientos longitudinales (eje x) y transversales (eje y), para corroborar el funcionamiento del sistema de estabilización (Figura 30).



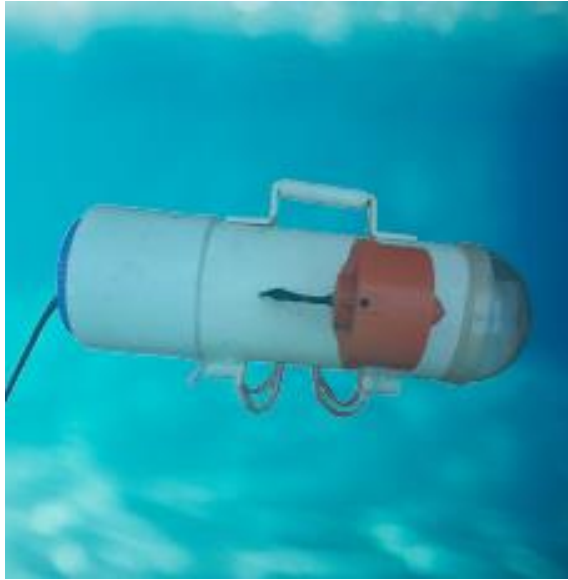
**Figura 30.** Prototipo en estado de flotacion.

**Experimento 4:** Se probó la inmersión y emersión del prototipo utilizando el tablero de control (figura 31). Se midieron, registraron, compararon y verificaron los tiempos de inmersión-emersión utilizando un cronómetro digital.



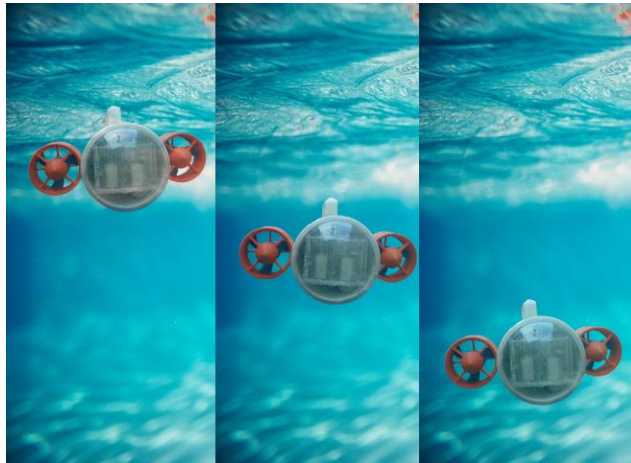
**Figura 31.** Prototipo sumergido para experimento 4.

**Experimento 5:** El SIE y el sistema de estabilidad se activaron como se muestra en el diagrama de flujo (Figura 8) para verificar su comportamiento (figura 32).

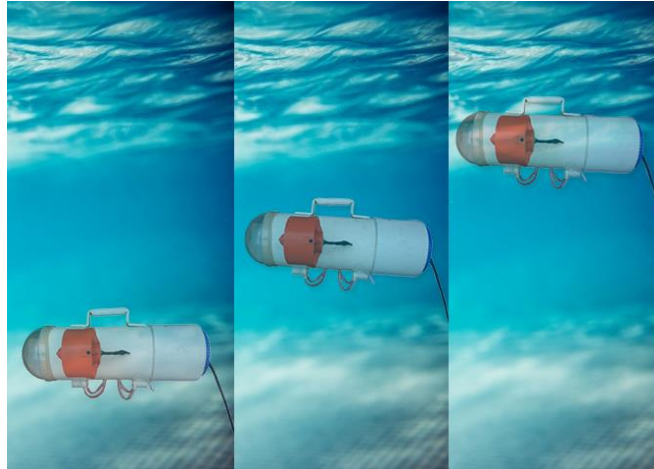


**Figura 32.** Prototipo sumergido con el SIE funcionando.

**Experimento 6:** En este último experimento se llevaron a cabo los movimientos de translación (adelante, atrás, izquierda y derecha) de acuerdo al diagrama de flujo (figura 11).



**Figura 33.** Proceso de inmersión del ROV



**Figura 34.** Proceso de emersión del ROV

## 4.2 Resultados.

**Resultados del experimento 1:** El primer experimento consto de seis eventos, durante los cuales se detectaron varias filtraciones en motores, cables, uniones de la cámara de lastre y en el casco, provocadas por la aplicación incorrecta de materiales (silicón, cera para depilar y empaques), las cuales se corrigieron paulatinamente, hasta lograr el aislamiento correcto.

**Resultados del experimento 2:** En el segundo experimento se realizaron tres eventos:

Evento 1.- Se coloco el prototipo sobre la superficie del agua sin alterar su masa de 6.99 kg. Se observó que el casco flota en su totalidad, comprobando que la fuerza de empuje ( $85.2\text{ N}$ ) es mayor que el peso del casco ( $68.502\text{ N}$ ).

Evento 2.- Se igualó el peso ( $85.2\text{ N}$ ) con la fuerza de empuje ( $85.2\text{ N}$ ) mediante el aumento de la masa hasta  $8.693\text{ Kg}$ . Se comprobó que al igualar las fuerzas el casco se mantiene en inmersión parcial.

Evento 3.- Se aumentó la masa del casco a  $8.7\text{ Kg}$ . Gando un peso de  $85.26\text{ N}$  y lográndose la inmersión total.

**Resultados del experimento 3:** El tercer experimento consto de tres eventos.

En los primeros dos eventos, se observó que la distribución de los componentes no permitía mantener el centro de equilibrio, en consecuencia, se realizaron las redistribuciones pertinentes.

En el tercer evento se observó que el sistema de estabilización trabajó según las condiciones dadas en la tabla I, se verificó la activación correcta de las bombas cuando el acelerómetro detectó inclinaciones fuera del rango. La activación de las bombas registrada se muestra en las Tablas 3, 4 Y 5

**Tabla 3.** Activación de Bombas I-E

Acción	Bomba	Estado
Inmersión	b1, b2, b3, b4	1
	b5, b6, b7, b8	0
Emersión	b1, b2, b3, b4	0
	b5, b6, b7, b8	1

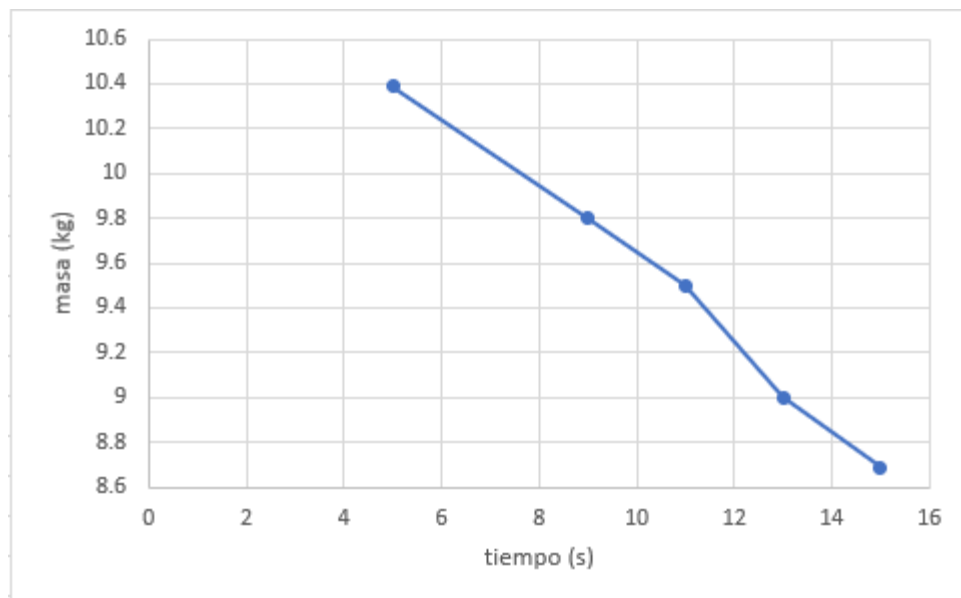
**Table 4.** Estado de las Bombas Acción de Inmersión

Movimiento	Grados	Bomba	Estado
Longitudinal (x)	x<-5	b1, b2	1
		b3, b4, b5, b6, b7, b8	0
	x>5	b3, b4	1
		b1, b2, b5, b6, b7, b8	0
Transversal (y)	y<-5	b1, b3	1
		b2, b4, b5, b6, b7, b8	0
	y>5	b2, b4	1
		b1, b3, b5, b6, b7, b8	0

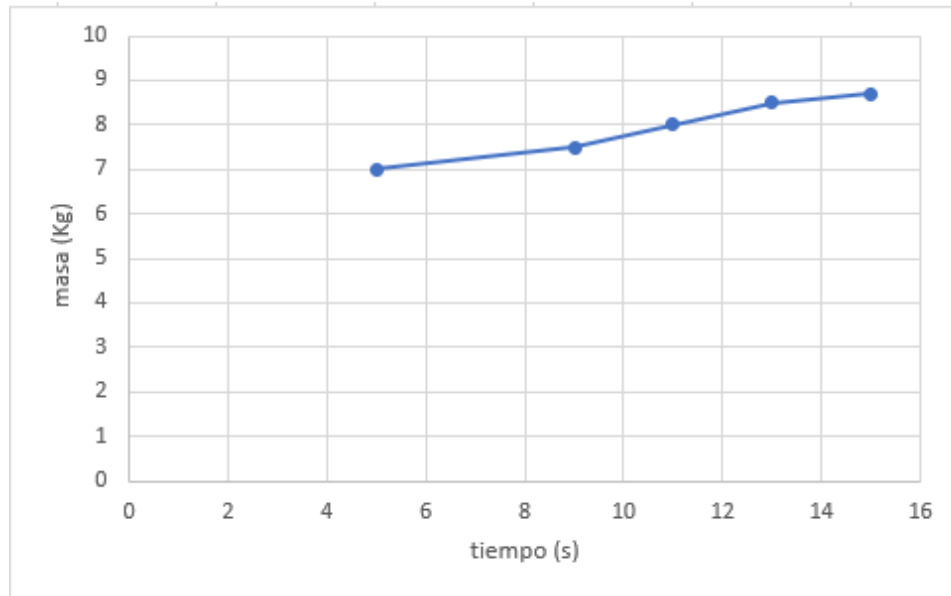
**Tabla 5.** Estado de las Bombas Acción de Emersión

Movimiento	Grados	Bomba	Estado
Longitudinal (x)	x<-5	b7, b8	1
		b1, b2, b3, b4, b5, b6	0
	x>5	b5, b6	1
		b1, b2, b3, b4, b7, b8	0
Transversal (y)	y<-5	b6, b8	1
		b1, b2, b3, b4, b5, b7	0
	y>5	b5, b7	1
		b1, b2, b3, b4, b6, b8	0

**Resultados del experimento 4:** En el cuarto experimento se midieron los tiempos de inmersión y emersión, los cuales variaron mediante el aumento de la masa del tanque. El tiempo de inmersión con la masa mínima de 8.7kg fue de 17s y con la máxima de 10.39kg fue de 5s. Se comprobó que a mayor masa menor tiempo de inmersión como se muestra en la figura 35, en caso contrario para el proceso de emersión se obtuvo un tiempo máximo de 15s y un tiempo mínimo de 5 s (Figura 36).



**Figura 35.** Tiempo de inmersión contra masa.



**Figura 36.** Tiempo de emersión contra masa.

**Resultados del experimento 5:** Se ejecutó el sistema completo (SIE y estabilidad), donde se observó que el casco descendió y ascendió con diferentes velocidades en función de la masa como se muestra en las Tablas 6 y 7.

**Tabla 6.** Velocidad de Inmersión

Tiempo(s)	Masa (kg)	Velocidad(cm/s)
5	10.39	34.00
9	9.8	18.89
11	9.5	15.45
13	9	13.08
15	8.69	11.33

**Tabla 7.** Velocidad de Emersión

Tiempo(s)	Masa (kg)	Velocidad(cm/s)
15	8.69	11.33
13	8.5	13.08
11	8	15.45
9	7.5	18.89
5	6.99	34.00

**Resultados del experimento 6:** En este último experimento se llevaron a cabo los movimientos de translación (adelante, atrás, izquierda y derecha). En la figura 37 se muestra el prototipo del vehículo acuático sumergible con sistema de estabilización.



**Figura 37.** Vehículo acuático sumergible con sistema de estabilización.

## Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros

Durante la realización de la etapa experimental se presentaron y abordaron diversos problemas que no se visualizaron en las etapas de diseño, por ejemplo: filtraciones y resistencia al agua, distribución de componentes y consumo de la batería. Así como el uso de herramientas, técnicas, mecánicas y eléctricas.

Para entender el funcionamiento de un submarino, se tomaron principios fundamentales como el de Arquímedes, presión hidrostática y fuerzas de empuje, los cuales se comprobaron paso a paso, permitiendo obtener los datos para las gráficas que se muestran en las figuras 35 y 36 y las Tablas 6 y 7. Se concluyó que a mayor masa la velocidad de inmersión es mayor y a menor masa la velocidad de emersión es mayor.

De acuerdo al cálculo de la presión hidrostática se concluye que el prototipo es capaz de soportar  $98000 \text{ N/m}^2$  lo cual le permite descender a una profundidad máxima de 10 m, debió al área donde se realizaron las pruebas solo se pudieron corroborar nuestros cálculos hasta una profundidad máxima de 1.7 m.

Mediante el principio de Arquímedes se comprobó que, si la fuerza de empuje es mayor que el peso del casco, esté flota. Si la fuerza de empuje es igual que el peso del objeto, el cuerpo está dentro del agua, pero no cubierto completamente. Si la fuerza de empuje es menor que el peso del casco este se hunde.

Se demostró que el sistema propuesto es viable para resolver el problema de estabilidad, inmersión-emersión de un submarino. También se comprobó que el SIE funciona de manera similar a los trabajos referenciados.

Como trabajo futuro se optimizará el rendimiento de la batería, se modelará matemáticamente el sistema en función de las variables internas y

externas, con la finalidad de obtener mejores tiempos de reacción y disminuir errores en ambientes no controlados, utilizando técnicas de simulación y agregando un sistema que permita manipular la profundidad en la que se desplaza el vehículo acuático.

## Bibliografía

1. Campos F. (2012). ¿Cuánta agua hay en la Tierra? Noviembre 15, 2017, de Cosmos Noticias Sitio web: <http://www.cosmonoticias.org/cuanta-agua-hay-en-la-tierra/>
2. O. Gherairi, M. B. Hamed and R. Boucetta, "Dynamic model of underwater vehicle", IEEE 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 23-25 March 2017, Hammamet, Tunisia. doi: 10.1109/GECS.2017.8066192
3. Domingo X., Guàrdia A., & Martinez L. (2014). "Robots submarinos". Noviembre 8, 2017, de Treball Opciona de Robòtica Sitio web: [http://www-assig.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2\\_03-04/submarinos/rov\\_his.htm](http://www-assig.fib.upc.es/~rob/protegit/treballs/Q2_03-04/submarinos/rov_his.htm)
4. Rebikoff-Niggeler Foundation, "Ada y Dimitri Rebikoff", Institution of Public Benefit, 2018, <https://www.rebikoff.org/history/>
5. S. A. Woods, R. J. Bauer, and M. L. Seto, "Automated Ballast Tank Control System for Autonomous Underwater Vehicles", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 37, no. 4, October 2012. doi: 10.1109/JOE.2012.2205313
6. Agrawal, B. Prasad, V. Viswanathan, and S. K. Panda, "Dynamic Modeling of Variable Ballast Tank for Spherical Underwater Robot", IEEE J. Ocean. Eng., vol. 40, no. 2, 2014. doi: 10.1109/JOE.2013.2321511
7. G. Antonelli, S. Chiaverini and N. Sarkar, "Adaptive control of an autonomous underwater vehicle experimental results on ODIN". IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 9, no 5, September pp.756-765, 2001. doi: 10.1109/CIRA.1999.809948
8. G Antonelli and S. Chiaverini, "Kinematic Control of Platoons of Autonomous Vehicles". IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 6, pp.1286-1287, December 2006. doi: 10.1109/TRO.2006.886272
9. X. lin, S. Guo, Y. Hao, X. Ye, C. Qiu and J. Du, "A Simplified Dynamic Modeling of a Spherical Underwater Vehicle", Proceedings of IEEE International conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok, Thailand, February 21-26 2009. doi: 10.1109/ROBIO.2009.4913161
10. Bi and Z. Feng, "Hierarchical Control of Underwater Vehicle Variable Ballast Systems", IEEE Xplore Date of Conference: 25-27 July 2018, Wuhan, China. doi: 10.23919/ChiCC.2018.8482802

11. H. Mohiuddin, S. Morsalin and K. Mahmud, "Design and fabrication of a prototype submarine using Archimedes principle", IEEE Xplore Date of Conference: 23-24 May 2014, Dhaka, Bangladesh. doi: 10.1109/ICIEV.2014.6850769
12. J. Szymborski, "Lead-acid batteries for use in submarine applications", IEEE Conference: 21-21 June 2002, San Antonio, TX, USA. doi: 10.1109/AUV.2002.1177196
13. T. Wang, X. Ye, L. Wang and Chao Zhang, "Hydrodynamic Analysis and Optimization for Dish Shaped Underwater Robot," Proceedings of the 2011 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation: August 7 - 10, Beijing, China. doi: 10.1109/ICMA.2011.5985782
14. Z. Liu, S. Guo, H. Li and X. Lin, "An Improved 3D Modeling of Water-jet Propellers for a Spherical Underwater Robot," Proceedings of the 2011 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation: August 7 - 10, Beijing, China. doi: 10.1109/ICMA.2011.5985677
15. Sanz P. J., Pérez J., Sales J., Fernández J. J., Peñalver A., Fornas D., García J. C., & Marín R., "MERMANIP: Avances recientes en la manipulación autónoma cooperativa submarina". Actas de las XXXVI Jornadas de Automática. Bilbao ISBN 978-84-15914-12-9 © 2015 Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC). 2 - 4 de septiembre (2015).
16. Forero Y. & Villamizar J. (febrero 02, 2014). Novedoso robot móvil submarino. Septiembre 11, 2017, de Mundo Vanguardia Sitio web: <http://www.vanguardia.com/actualidad/mundo/244851-novedoso-robot-movil-submarino>.
17. PowerVisio. "PowerVision anuncia la preventa del robot submarino PowerRay". Septiembre 12, 2017, de RenoVacion Sitio web: <http://renovacion.eu/2017/04/12/powervision-anuncia-la-preventa-del-robot-submarino-powerray/>
18. EcoExploratorio. "Exploración submarina", Museo de ciencias de Puerto Rico, 2018, <https://ecoexploratorio.org/vida-en-el-mar/exploraci%CF%8Cn-submarina/>.
19. Héctor P. Montiel, "FISICA GENERAL BACHILLERATO", Grupo Editorial Patria, edición 4, (2011).
20. Centro de estudios cervantinos, "Presión hidrostática: ¿qué es y cómo se calcula?", agosto 2017, <https://www.centroestudioscervantinos.es/presion-hidrostatica/>

21. Leonardo Vite Terán, “Principio de Arquímedes”, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2018, <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/m4.html>
22. Ecoexploratorio, “EXPLORACIÓN SUBMARINA”, Museo de ciencias de Puerto rico, 2017, <https://ecoexploratorio.org/vida-en-el-mar/exploraci%CF%8Cn-submarina/>
23. Héctor A. Moreno, Roque Saltarén, Lisandro Pugliese, Isela Carrera, Pedro Cárdenas, Cesar Álvarez,” Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control”, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 11 (2014) 3–19, Elsevier España, S.L. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2013.11.001>
24. Evans, J., Redmond, P., Plakas, C., Hamilton, K., Lane, D., Autonomous docking for intervention-aUVs using sonar and video-based real-time 3d pose estimation. Vol. 4. pp. 2201 – 2210, 2003.
25. Marani, G., Choi, S. K., Yuh J. Underwater autonomous manipulation for intervention missions aUVs. Ocean Engineering 36 (1), 15 – 23, 2009.
26. DeNovi, G., Melchiorri, C., García, J., Sanz, P., Ridao, P., Oliver, G., 2010. A new approach for a reconfigurable autonomous underwater vehicle for intervention. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine 25
27. WH Wang, RC Engelaar, XQ Chen, JG Chase. “7 The State-of-Art of Underwater Vehicles – Theories and Applications”, University of Canterbury, New Zealand, 2014.
28. Controladores industriales de diseño de alto nivel, “Sistemas embebidos”, Departamento de Ingeniería Eléctrica, electrónica y de Control, <http://www.ieec.uned.es/>.
29. Vicente García, “Sensor MPU6050”, Electrónica Aplicada. 9 septiembre 2015. <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/sensor-mpu6050>.
30. H. A. Moreno, R. Saltarén, L. Puglisi, I. Carrera, P. Cárdenas and C. Álvarez, “Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control”, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, [S.I.], v. 11, n. 1, p. 3-19, ene. 2014. ISSN 1697-7920. doi: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.11.001>.
31. C. T. Ross, “A conceptual design of an underwater vehicle”, ELSEVIER Ocean Engineering, vol. 33, Issue 16, November 2006, Pages 2087-2104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.11.005>
32. H. Pérez. “Principio de Arquímedes y flotación de los cuerpos. En física general (272 pp). México: Grupo editorial patria (2014).

33. G. Antonelli, D. Yoerger and T. I. Fossen, "Underwater Robotics", Springer Handbook of Robotics (pp.987-1008), January 2008
34. H. Mohiuddin, S. Morsalin and K. Mahmud, "Design and fabrication of a prototype submarine using Archimedes principle", IEEE 3rd international conference on informatics, electronics & vision 2014, Dhaka, Bangladesh. doi: 10.1109/ICIEV.2014.6850769
35. S. L. Wood, A. Hendricks and M. Corbet, "Automated buoyancy control system for a remotely operated underwater crawler", IEEE Conference: 18-21 May 2015, OCEANS 2015, Genoa, Italy. doi: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271238
36. J. García, I. Angulo, G. Martínez and D. López, "Archimedes Remote lab for Secondary Schools", IEEE Conference: 2015 3rd Experiment International Conference (exp.at'15), Ponta Delgada, Portugal. doi: 10.1109/EXPAT.2015.7463215
37. C. Álvarez, R. Saltaren and R. Aracil, "Concepción, desarrollo y avances en el control de navegación de robots submarinos paralelos: el robot remo i.", Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 6 (3), 92–100. doi: 10.1016/S1697-7912(09)70268.
38. E. Cavallo, R. C. Micheleni and V. F. Filaretov, "Conceptual Design of an AUV Equipped with a Three Degrees of Freedom Vectored Thruster", Journal of Intelligent and Robotic Systems (2004) 39: 365. doi: <https://doi.org/10.1023/B:JINT.0000026081.75417.50>
39. Y.G. Le Page and K.W. Holappa, "Simulation and control of an autonomous underwater vehicle equipped with a vectored thruster" OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158), Providence, RI, USA. doi: 10.1109/OCEANS.2000.882249
40. K.P. Valavanis, D. Gracanin, M. Matijasevic, R. Kolluru and G.A. Demetriou, "Control architectures for autonomous underwater vehicles", IEEE Control Systems Magazine vol: 17, Issue: 6, Dec. 1997, doi: 10.1109/37.642974
41. J. H. Li, S. k. Park, S. Oh, J. Suh, G. Hwan Yoon and M. Baek, "Development of a Hovering-Type Intelligent Autonomous Underwater Vehicle, P-SURO", October 21st 2011. doi: 10.5772/24620