



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Diseño y construcción de un minisubmarino explorador,
equipado con un sistema de lastre

T E S I S

para obtener el grado de:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

por

Missael Eduardo Barrales Romero

Asesorado por

Dr. José Eladio Flores Mena

y

Dr. Antonio Michua Camarillo

Puebla Pue.
10 de diciembre de 2022



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Diseño y construcción de un minisubmarino explorador,
equipado con un sistema de lastre

T E S I S

para obtener el grado de:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

por

Missael Eduardo Barrales Romero

Asesorado por

Dr. José Eladio Flores Mena

y

Dr. Antonio Michua Camarillo

Puebla Pue.
10 de diciembre de 2022

Título: Diseño y construcción de un minisubmarino explorador,
equipado con un sistema de lastre

Estudiante: MISSAEL EDUARDO BARRALES ROMERO

COMITÉ

Dr. Manuel Aparicio Razo
Presidente

Dr. Enrique Rafael García Sánchez
Secretario

Dr. José Fermi Guerrero Castellanos
Vocal

Dr. José Eladio Flores Mena
y
Dr. Antonio Michua Camarillo
Asesores

Dedicatoria

"Los científicos de hoy piensan profundamente en lugar de claramente. Uno debe estar cuerdo para pensar con claridad, pero uno puede pensar profundamente y estar completamente loco"

Nikola Tesla (1856-1943)

Ingeniero y Físico Croata

A mi Familia y amigos ...

Agradecimientos

La culminación de una etapa extraordinaria de mi vida no habría sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia, por ello quiero agradecer a mi padre Miguel Barrales Calixto y a mi madre Margarita Romero Velázquez por la paciencia que me han dado a lo largo de este camino; gracias por tantos años de orientación y lecciones de vida, que no les quepa duda que estaré siempre para ustedes así como ustedes lo han estado para mí. A mis hermanos Miguel, Manuel y Mayari por su cariño y compañía.

A todos mis amigos, compañeros y profesores que hicieron de la facultad mi segunda casa y a quienes tendré siempre en mi memoria.

A mi jurado por su valiosa retroalimentación, Dr. Manuel Aparicio Razo, Dr. Jose Fermi Guerrero Castellanos, Dr. Enrique Rafael García Sánchez.

Finalmente les agradezco al Dr. José Eladio Flores Mena y Dr. Antonio Michua Camarillo por su paciencia, apoyo y dirección en el desarrollo de este trabajo y de sus enseñanzas en el aula, sin las cuales no tendría claro cuál es el camino profesional que deseo seguir.

A todos ustedes, muchas gracias.

Índice general

Resumen	XV
Introducción	XVII
1. Fundamentos teóricos	1
1.1. Minisubmarino	1
1.2. Modelo dinámico genérico de un submarino	4
1.3. Fuerzas que actúan sobre un vehículos bajo el agua	6
1.3.1. Fuerzas ambientales que actúan sobre el minisubmarino	6
1.3.2. Fuerza de una propela	11
1.4. Elementos electromecánicos	12
1.5. Propelas	14
1.5.1. Diferentes tipos de propelas	15
1.5.2. Parámetros para elegir una propela	18
1.6. Elementos electrónicos	20
1.6.1. Arduino	20
1.6.2. Sensores	21
2. Diseño y construcción de un minisubmarino	23
2.1. Minisubmarino 1	23
2.1.1. Chasis	24
2.1.2. Propelas	24
2.1.3. Ensamble mecánico	25
2.1.4. Ensamble electrónico	25
2.2. Minisubmarino 2	27
2.2.1. Chasis	28
2.2.2. Ensamble electrónico	28
2.2.3. Sensores	29
2.2.4. Sistema de lastre	33
2.3. Análisis comparativo entre Minisubmarino 1 y 2	36
3. Resultados de exploración	39
3.1. Pruebas de inmersión	39
3.2. Pruebas con los sensores	39
3.2.1. Termalización de Sensores	40
3.2.2. Valores medios de sensores	40
4. Conclusiones	47
A. Constancia-LXIV-CNF	49

B. Primer Foro Regional Tlaxcala	51
C. Congreso Nacional Mecatrónica 2022	53
Apendice C	54
Bibliografía	55

Índice de figuras

1.1. Piezas del mini-submarino. Lastre: peso que se agrega a una embarcación. Casco: estructura externa del mini-submarino, propela: pieza mecánica que ayuda a impulsar el mini-submarino [6]	2
1.2. Mini-submarino tipo ROV conocido como Roving Bat es un prototipo multipropósitos híbrido encargado de realizar tareas de inspección y limpieza [4]	2
1.3. Mini-Submarino Tipo AUV, este vehículos submarino autónomo (AUV) funciona con energía solar. La cantidad de potencia disponible y el peso de la fuente de alimentación son factores importantes para los diseñadores AUV y usuarios. Imagen cortesía de AUVfest 2008 [7].	3
1.4. Sistema fijo al cuerpo e Inercia [14]. (b) Sistema de referencia de movimiento de un vehículo [6]	5
1.5. $\vec{F}_f=W$ (en el equilibrio) [13]	6
1.6. (a) Equilibrio estable [13]. (b) Fuerzas actuando en un minisubmarino [6]	7
1.7. (a) Equilibrio inestable [13]. (b) Fuerzas actuando en un minisubmarino [6]	7
1.8. Equilibrio neutro [13]	8
1.9. Cuerpo en equilibrio [13]	9
1.10. Metacentro [13]	9
1.11. Cuerpo prismático cuyo centro de gravedad se encuentre sobre el eje vertical del cuerpo [13]	10
1.12. Fuerza viscosa. Muestra la interacción de las fuerzas en una partícula dentro de un fluido.	12
1.13. Tanque de lastre en un submarino doble casco. [8]	12
1.14. Tanque de lastre a presión. [8]	13
1.15. Tanque de lastre de pistón. [8]	14
1.16. Fuerzas de sustentación y arrastre. [17]	15
1.17. a) Efectos del viento sobre un elemento de aspa (pala) [17]	17
1.18. b) Viento aparente. [17]	17
1.19. Propela en movimiento, generando una fuerza de empuje con el agua. [18]	18
1.20. Relación creciente entre el área de superficie de las aspas y el área del disco de la propela [20]	19
1.21. a) formato DIP, b)formato SMD, [22]	21
2.1. Diseño de minisubmarino	24
2.2. Propela de minisubmarino. Diseño original	24
2.3. Construcción parte externa	25
2.4. Base Pendular [16]	26
2.5. Resultados obtenidos de los motores con su propela	27
2.6. Resultados obtenidos de los motores con su propela	27
2.7. Submarino en SolidWorks	28
2.8. Motor armado	29

2.9. Soporte de hélice	29
2.10. Sensor Digital De Temperatura Ds18b20 Resistente Al Agua	30
2.11. Ph-4502c Sensor De Ph Liquido Con Electrodo E201-bnc	31
2.12. Sensor ms5837	32
2.13. Módulo Bluetooth	33
2.14. Análisis de fluidos propuesta No.1 de sistema de lastre	34
2.15. Tanque de lastre propuesto	34
2.16. Análisis de fluidos sistema de lastre, segunda propuesta, presión hidrostática interna	35
2.17. Análisis de presión externa sistema de lastre, Puntos de presión más afectados	35
2.18. Caracterización de sistema de lastre (Litros - Tiempo)	36
2.19. (a) Minisubmarino 1 armado, (b) Minisubmarino 2 armado	37
2.20. (a) Diagrama de comunicación Minisubmarino 1, (b) Diagrama de comunicación Minisubmarino 2 armado	38
3.1. Estabilidad de prototipo minisubmarino	40
3.2. Termalización de Sensores a una profundidad de 0.3m en el punto C=(10,4,0) (Fig. 3.3) (b). En (a) se muestran las mediciones del presión, en (b) se muestran las mediciones de Temperatura, en (c) se muestran las mediciones de pH	41
3.3. En (a) se muestran los valores medios de los sensores externos. En (c) se muestran las mediciones del presión, en (d) se muestran las mediciones de Temperatura, en (e) se muestran las mediciones de pH. En (b) se muestran las coordenadas en donde se hicieron las mediciones y la ruta de navegación que se realizó.	42
3.4. a) Datos obtenidos de presión-profundidad Minisubmarino 1 [16], b) Datos obtenidos de presión-número de muestras Minisubmarino 2	44
3.5. a) Datos obtenidos de temperatura-profundidad Minisubmarino 1 [16], b) Datos obtenidos de temperatura-número de muestras Minisubmarino 2	45
A.1. Diseño sistema de lastre	49
B.1. Diseño y construcción de un minisubmarino explorador de aguas no profundas.	51
C.1. Congreso Nacional de Mecatrónica 2022	53

Índice de tablas

1.1. Notación común para el movimiento de vehículos marítimos	5
1.2. Tipos de tanque de lastre	14
1.3. Características de las propelas por su uso.	18
2.1. Especificaciones de motores Brushless	25
2.2. Características de motores Brushless	26
2.3. Comparación de sensores	33
2.4. Comparación de minisubmarinos	38

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el estudio sobre diseño y actualización de un minisubmarino explorador equipado con un sistema de lastre. Un minisubmarino es un sistema electromecánico de gran interés científico, ya que, puede tener muchas aplicaciones tecnológicas, como es la exploración de ambientes hostiles para el humano. También el interés científico es debido a que el modelado de las fuerzas ambientales a las que está sujeto no son fáciles de considerar debido a que en las ecuaciones hidrodinámicas que describen el movimiento de un objeto sólido inmerso en un fluido aparecen coeficientes que dependen de la geometría del cuerpo y del fluido, los cuales deben ser determinados experimentalmente. Por otro lado, las aplicaciones tecnológicas de estos dispositivos son amplias tanto en el mar, lagos, lagunas y ríos. Una aplicación básica que motivó a desarrollar este tipo de sistemas es la exploración, lo cual significa proveer al minisubmarino de sensores para que puedan medir ciertas magnitudes físicas que sean útiles en el diagnóstico del ambiente acuífero que se explora.

En este trabajo de tesis se diseñaron y construyeron actualizaciones para un minisubmarino construido con anterioridad, ver referencia [16], sin embargo, en este prototipo, las perturbaciones que provocan los motores en el ambiente influían de manera negativa en las mediciones de los sensores con los que estaba equipado este prototipo. Con esta actualización se evitó esta perturbación, diseñando la estructura del minisubmarino y la colocación de los sensores de tal manera que las mediciones son confiables, además, se equipó al minisubmarino con un sistema de lastre el cual tiene la función de ahorrar energía en la inmersión. El diseño de las partes del minisubmarino explorador como son el chasis (compartimientos cilíndricos, patines de estabilidad y barra de soporte del tercer motor), propelas y toberas se realizaron usando el software comercial SolidWorks, la construcción de estas partes se realizó por medio de una impresora 3D.

En los compartimientos cilíndricos del chasis, se colocó la parte electrónica, por lo que, el sellado de éstos fue de gran importancia; para el sellado de estos comportamientos, se realizó la unión de los cilindros de acrílico con los tapones de registro, los cuales contienen un tapón de metal con rosca, para abrir y cerrar sin problema los compartimientos. Se realizaron las pruebas de inmersión a una profundidad de 2 metros, las cuales resultaron ser un éxito, debido a que no hubo filtraciones en los compartimientos.

En cuanto a la electrónica fue efectuada la caracterización de los motores (brushless) para conocer su rango de operación y la carga que soporta con respecto a la demanda de corriente. Se desarrolló un programa en LabView para la adquisición de datos por los sensores, incluyendo la sintonización del funcionamiento de los motores y el módulo para la comunicación vía bluetooth, ésta comunicación es para guiar el movimiento del prototipo.

En el diseño propuesto la adquisición de datos se efectúa en sitio gracias a la comunicación bluetooth con el dispositivo receptor, creando un interruptor que encendiera o apagara los sensores una vez ubicado en el punto deseado, ya que, los datos obtenidos por los sensores eran almacenados en una memoria externa acoplada a la tarjeta Arduino Uno, teniendo que esperar a sacarlo del

ambiente para poder analizar los datos obtenidos.

En cuanto al diseño y construcción del sistema de lastre, se menciona que se puede utilizar un volumen de 1900 cm^3 , con lo que nos permite un ahorro de energía al agregar un sistema de lastre para mantener una mejor estabilidad dentro del agua, reduciendo el número de fuentes de alimentación a una sola, debido a que el prototipo anterior usaba 3 baterías para alimentación.

En el prototipo propuesto los sensores que se utilizaron son de mejor calidad para obtener un mejor muestreo lo que se reflejará en los resultados de los datos obtenidos.

Introducción

Los recursos hídricos de Puebla incluyen importantes fuentes de agua superficial y subterránea. Se identifican cuatro regiones hidrológicas: Pánuco al noroeste; Tuxpan-Nautla al norte; Papaloapan al este y sureste, y Balsas en el centro del territorio poblano. Su aprovechamiento es el siguiente: agricultura ($1,962 \text{ hm}^3$), abastecimiento público (385 hm^3), industria autoabastecida (35.2 hm^3) y energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad (6.5 hm^3). En el estado, 24.84 % del agua destinada a los diferentes usos es subterránea y 75.16 % es superficial. De acuerdo con el balance hidrológico global para el estado, se estima que la cantidad total de agua que ingresa, así como el volumen que sale de él o se pierde, revela un excedente disponible de agua superior a los $5,000 \text{ hm}^3$; sin embargo, el volumen no se encuentra uniformemente distribuido, pues mientras algunas zonas, como la Sierra Norte, cuentan con abundantes corrientes superficiales, en la porción sur y área de la mixteca son escasas, de poco caudal y son casi totalmente aprovechadas, aunque representan problemás de contaminación. De los 19 acuíferos ubicados en Puebla, dos se encuentran sobreexplotados: el del Valle de Tecamachalco, el de la cuenca del río Atoyac, y el de Tepalcingo-Axochiapan, el de la cuenca del río Amacuzac. Además de la sobreexplotación, Puebla presenta casos graves de contaminación en los ríos Atoyac y Alseseca, que resultan de las descargas de aguas residuales provenientes de las principales actividades económicas como los servicios y, fundamentalmente la industria en sus diferentes ramos. Se ha detectado también que las aguas residuales que fluyen por el drenaje de Valsequillo contienen metales pesados como zinc, plomo, cobre, níquel, selenio, cadmio, cromo y mercurio. La Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Puebla identifican algunos problemas en el abastecimiento de agua potable, como distribución no uniforme; el servicio se otorga por tandeo, principalmente en los centros urbanos. Otro problema es la falta de disponibilidad de aguas superficiales por estar concesionadas en su mayoría para uso agrícola e industrial. Por último, de acuerdo a su ubicación geográfica, Puebla se encuentra sujeta a fenómenos hidrometeorológicos extremos que han provocado efectos devastadores [1].

La cuenca Atoyac-Zahuapan es una región rica en agua que se nutre de muy diversos ríos, condición que la ha convertido en un espacio atractivo para las industrias, principalmente textiles y de autopartes. Los ríos han pasado de ser parte fundamental de la cultura y espiritualidad de las comunidades a drenajes para más de 22,000 empresas. Se calcula que se vierten hasta 200 millones de metros cúbicos de agua residual al año. La mayor parte de las descargas llegan de forma directa al río Atoyac; el resto, a través de canales, riachuelos e infiltraciones. Corredores como los de Huejotzingo y Cuautlancingo son los principales emisores de contaminantes que perjudican principalmente a las zonas de cultivo. Como expuso el Dr. Samuel Rosado Zaidi en un foro especializado de la IBERO Puebla, la historia de las comunidades de la región data de los primeros asentamientos en Cacaxtla y Xochitecatl, atraídos por la abundancia de agua y tierra fértil. La convivencia armónica con las condiciones ambientales favorables se dio durante siglos hasta la llegada del modelo industrial en el siglo XX. En su mayoría campesinas, las comunidades están expuestas a una diversidad de sustancias genotóxicas que derivan en enfermedades en la piel,

intoxicaciones, malformaciones y muertes prematuras. Esta vulneración ha sido denunciada por décadas ante instancias locales y nacionales; también se han emprendido acciones comunitarias para proponer un protocolo de saneamiento integral de la cuenca. Ante la inacción de las autoridades, el Centro Fray Julián Garcés (recientemente condecorado por el Sistema Universitario Jesuita) abordó la problemática desde un análisis meticuloso de la situación, donde se brindó asesoría a los pobladores y se visibilizó la problemática a nivel nacional. En su colaboración con el colectivo, la Dra. Regina Montero Montoya contribuyó a demostrar que existe una correlación entre la industrialización de las comunidades y las alteraciones en los procesos biológicos de sus pobladores. Por ello, recomendó realizar seguimientos permanentes a la salud de los habitantes para ofrecer una atención temprana. Las emisiones cuestan vidas. De acuerdo con un estudio realizado entre 2000 y 2019, las mayores tasas de mortalidad en las comunidades cercanas a la cuenca se registran en la vejez y en la primera infancia; los adolescentes y jóvenes son los que más se ven afectados en el tiempo. Además, los varones en edades adolescente, joven y adulta tienen mayor probabilidad de morir que las mujeres. El 75 % de las muertes en la región son provocadas por enfermedades. La Dra. Gabriela Pérez Castresana señaló que la mortalidad por condiciones crónicas no transmisibles es clave para determinar la salud pública de una región, pues su estudio contribuye a identificar factores ambientales de riesgo y patrones que permitan definir las políticas de salud [2].

Con o sin bajos niveles, la presa de Valsequillo es una barrera humana para la fauna con sus altos niveles de contaminación, según lo advierte la activista medioambientalista Verónica Mastreta Guzmán. En entrevista con *El Universal Puebla* sobre la crisis que se observó en el cuerpo de agua en las últimas semanas con el retraso de las lluvias, expuso que las aves y especies acuáticas de por sí encuentran condiciones complicadas. La presa, recordó, se nutre de las aguas del río Alseseca y de la cuenca del río Atoyac, en la que la asociación Dale la Cara al Atoyac ha logrado documentar la presencia de contaminantes superiores a la norma. En el caso de las aves, detalló, se han llegado a ver algunas especies en las aguas superficiales más alejadas del ingreso del agua, pues el lirio permite una mejor calidad en las capas altas. “Ese tipo de fauna también la puedes ver en los alrededores de Valsequillo y pueden buscar agua superficial, lo que está muy, muy contaminado es lo que está entrando a la presa”, dijo. De acuerdo con Mastreta Guzmán el tipo de aves en tránsito que pasan por Valsequillo son similares a las que llegan a la laguna de San Baltazar que está cercana. Asimismo llegan a la continuidad del río Atoyac que unos 15 kilómetros después de la presa y con rumbo a Guerrero, se regenera y permite mejores condiciones para la fauna. “El río se regenera, obvio ¿qué los afecta? Pues la barra humana, siempre es la barra humana”, agregó. Sin embargo las condiciones no son iguales para la fauna acuática, pues a diferencia de las aves que pueden transitar hacia aguas de mejor calidad, los peces y tortugas tendrían que sobrevivir en la presa y su contaminación lo dificulta [3].

La exploración de lagos y lagunas con aguas tranquilas es un tema fundamental en estos días, debido a la contaminación que sufre este tipo de sistemas. El saneamiento de estos sistemas implica un diagnóstico de los mismos y con este fin es necesario un UV (por sus siglas en inglés, Underwater Vehicle) equipado con sensores, capaz de medir las condiciones del sistema. A partir de esta valoración es posible implementar estrategias para el saneamiento de lagos o lagunas contaminados. En la literatura existen diversos diseños de UVs manipulados por medio de cables. Si las dimensiones de dichos sistemas a explorar son grandes, el tamaño del cableado aumenta volviéndose este un problema. Esta es la motivación por la que se propone diseñar y construir un UV manipulado mediante comunicación inalámbrica [4].

Los ROV (Vehículos de Operación Remota) son vehículos submarinos que están conectados mediante cables a una base control en la superficie y desde donde se realiza el manejo del vehículo, significa que los ROV requieren de la recepción de diversos comandos para su manejo y en algunos casos este puede ser programado para seguir patrones específicos o ir a localizaciones determinadas, también hay minisubmarinos con cables tensos para operaciones de remolque marino, inspección

de cables y ductos subacuáticos mediante tecnologías ROV, así como inspección de cascos de barcos. Muestreo sistemático de fondo para toma de muestras biológicas o geológicas mediante tecnología ROV. Dada su gran versatilidad los ROVS son usados en un sin fin de industrias. Los ROVS pueden funcionar mediante una conexión inalámbrica o una conexión con cable, siendo estos últimos los más comunes debido a la complejidad que supone la transmisión de ondas de radio en el fondo marino. La función principal de este cable umbilical (denominado comunmente en el argo de los ROV como TETHER) consiste en establecer el enlace o conexión entre el piloto y el ROV, administrando tanto la alimentación eléctrica del vehículo como la propia transmisión de datos (video, telemetría, sensores, sonar, etc) los ROVS más sofisticados emplean un sistema de gestión de conexión (TETHER Management system) que gestiona el propio TETHER que funciona como un punto de estacionamiento para el ROV, permitiéndole operar incluso en profundidades de hasta 914.4 metros [4, 5].

Los vehículos marinos están sujetos a las perturbaciones ambientales que pueden afectar el movimiento y estabilidad de un vehículo. Las fuerzas ambientales son: la fuerza de flotación, fuerza de gravedad, fuerza de masa añadida, las fuerzas hidrodinámicas, los oleajes, las fuerzas viscosas, etc, todas estas fuerzas representan un reto para modelarlas debido a que dependen de parámetros que son difíciles de medir y de modelar. Controlar un vehículo bajo el agua presenta dos grandes retos que son: el modelo dinámico del vehículo marino y la retroalimentación inalámbrica. En la actualidad existen dos maneras diferentes de sumergir un submarino, de manera estática y de manera dinámica. Varios modelos de submarinos y de minisubmarinos hacen uso de un sistema dinámico de inmersión, mientras que mayoritariamente los submarinos militares hacen uso de sistemas estáticos de inmersión y en algunas ocasiones la combinación de ambos. [6].

Uno de los componentes más importantes de un vehículo bajo el agua es el sistema de lastre que permite modificar la flotabilidad mediante la introducción de agua en sus tanques de lastre. Estos tanques pueden estar ubicados de tres maneras diferentes:

- dentro del casco presurizado,
- fuera del casco presurizado como tanques adicionales,
- entre el casco exterior y el casco presurizado.

Una de las principales desventajas de tener el tanque dentro del casco es el espacio que ocupa, ya que este podría ser ocupado para más personal o equipamiento.

En base a la problemática señalada anteriormente de diagnosticar un ambiente hídrico se diseñó y construyó un minisubmarino explorador con 3 motores en 2017, ver referencia [8], 2 motores a los lados independientes para el desplazamiento horizontal y 1 motor para la inmersión y emersión; equipado con sensores para medir la profundidad y temperatura. Sin embargo, este prototipo presentó un problema en la adquisición de datos, debido a que las propelas influían en las mediciones de los sensores. Además, el prototipo operaba con 3 baterías para su funcionamiento [8].

En base a lo anteriormente señalado se propuso en este proyecto de tesis hacer una actualización de un minisubmarino con fines de exploración con los siguientes objetivos.

OBJETIVO GENERAL. Diseñar y construir un minisubmarino explorador equipado con un sistema de lastre que pueda manipular el hundimiento vertical.

- **OBJETIVO PARTICULARES.**

1. Diseñar y construir un minisubmarino explorador en base a un minisubmarino ya construido (Ver referencia [8]), se reconfigura la posición de los motores y se implementan sensores con mayor sensibilidad, con el fin de optimizar la exploración.
2. Diseñar, simular y construir un sistema de inmersión denominado lastre, con el objetivo de mejorar el diseño para elegir las dimensiones apropiadas para construir el sistema de lastre, usando el programa SolidWorks.
3. Realizar pruebas de inmersión, en aguas poco profundas de no más de 3m, esto con el fin de observar y corregir si existen filtraciones.
4. Realizar las pruebas de exploración que consistirán en medir, la profundidad y temperatura en un punto específico.
5. Publicar los resultados obtenidos en congresos nacionales.

Todos estos objetivos se han cumplido.

El material contenido en esta tesis está organizado de la siguiente forma: En el capítulo uno se hace una breve descripción de los conceptos y de las leyes físicas necesarias para el desarrollo del presente manuscrito de tesis, por ejemplo, los elementos más importantes de un minisubmarino. En seguida, en el capítulo dos se presenta la descripción teórica y numérica del trabajo de tesis, así como la descripción del planteamiento del problema que no se pudo solucionar en la tesis anterior, correspondiendo a una toma de datos más limpia. Posteriormente en el capítulo tres se muestran los resultados numéricos y se comparan con resultados teóricos disponibles en la literatura y se hace una discusión sobre ellos. Finalmente en la sección de conclusiones se presentan los datos y comparaciones más relevantes del trabajo de tesis.

Capítulo 1

Fundamentos teóricos

En este capítulo se presenta una breve revisión de los conceptos relacionados con el tema de desarrollo de un minisubmarino explorador, equipado con un sistema de lastre, también revisamos los conceptos teóricos que se relacionan con la física y electrónica vinculadas con el tema de esta tesis. En la primera sección se realiza una discusión acerca de lo que se entiende por un minisubmarino y sus aplicaciones, esto a manera de introducción en los conceptos y lenguaje usado en el tema de vehículos bajo el agua. Enseguida, en la segunda sección se realiza un análisis sobre el modelo dinámico genérico de un submarino, esto para entender el modelo matemático de un dispositivo bajo el agua. En la tercera sección se abordan las diferentes fuerzas ambientales que influyen en el prototipo. En la cuarta sección se habla sobre la parte mecánica que se requiere para poder llevar a cabo el prototipo. En la quinta sección se habla sobre la elección de características para el diseño y las fuerzas que se toman en consideración al momento de elegir propelas. Finalmente, en la sexta sección se aborda sobre la definición, características y tipos de un dispositivo conocido como sensor.

1.1. Minisubmarino

Los vehículos submarinos o también conocidos como UV (por sus siglas en inglés Underwater Vehicle), son vehículos capaces de operar bajo el agua sin necesidad de presencia humana, como se muestra en la Figura 1.1, este tipo de vehículos están compuestos por un casco, propelas y lastre.

Esta clase de vehículos también son conocidos como vehículos Submarinos no tripulados, UUV (por sus siglas en inglés Unmanned Underwater Vehicle) y estos se dividen en dos categorías principales: vehículos Remotamente Operados, ROV (por sus siglas en inglés, Remote Operated Vehicle), y vehículos Submarinos Autónomos, AUV (por sus siglas en inglés Autonomous Underwater Vehicle) [9].

Los ROV son vehículos submarinos que están comunicados mediante cables a una base control en la superficie y desde donde se lleva a cabo el manejo del vehículo, significa que los ROV requieren de la recepción de diversos comandos para su manejo y en algunos casos este puede ser programado para seguir patrones específicos o ir a localizaciones antes establecidas, en la Figura 1.2 se muestra un minisubmarino conocido como Roving Bat, el cual es un prototipo multipropósito híbrido encargado de realizar tareas de limpieza y muestreo sistemático de fondo para toma de muestras biológicas o geológicas mediante tecnología ROV [4].

El cable que conecta a los ROV también conocido como cable umbilical, provee al vehículo de una conexión de datos para su control; además de proveer la energía necesaria para su funciona-

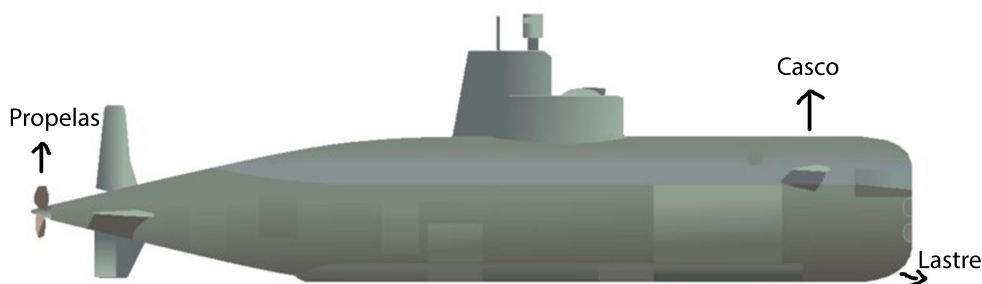


Figura 1.1: Piezas del mini-submarino. Lastre: peso que se agrega a una embarcación. Casco: estructura externa del mini-submarino, propela: pieza mecánica que ayuda a impulsar el mini-submarino [6]

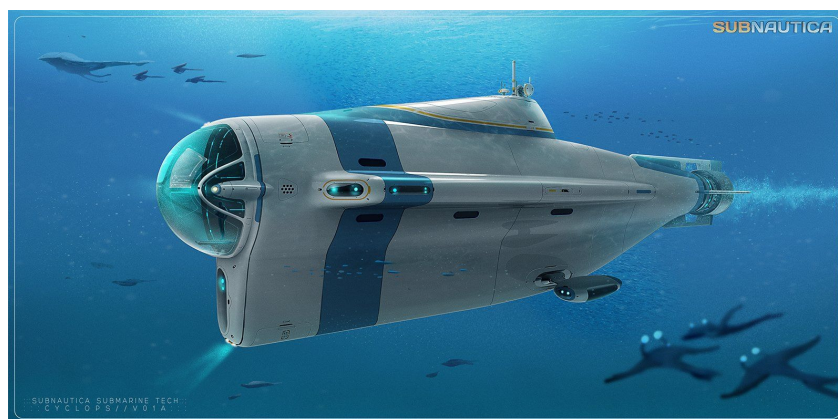


Figura 1.2: Mini-submarino tipo ROV conocido como Roving Bat es un prototipo multipropósitos híbrido encargado de realizar tareas de inspección y limpieza [4]

miento, usualmente este cable se encuentra reforzado en caso de que se requiera recuperar el ROV. Los ROV originalmente fueron desarrollados para usos militares, pero su desarrollo se vio afectado con el fin de aplicarlos para la inspección de gasoductos o de tuberías submarinas. Las principales características del ROV son:

- Posee propulsores, lo que le permiten navegar y posicionarse.
- Posee cámaras e hidrófonos, lo que dará a la base de control la capacidad de poder escuchar lo que sucede bajo el agua.
- La capacidad de equipar diversos sensores como sensores de temperatura, de profundidad o sonares.

Existen diferentes tipos de ROV, los más comunes son los:

1. Los ROV de trabajo están diseñados para realizar tareas sencillas y complejas, ya que dependiendo de su configuración pueden llevar a bordo uno o varios manipuladores, estos pueden trabajar entre profundidades de 2000 - 3500 metros. Usualmente este tipo de ROV son utilizados para realizar trabajos de recuperación de objetos, excavación en aguas profundas o trabajos de reparación. En algunos casos este tipo de vehículos pueden llegar a profundidades de hasta 6000 metros, usualmente para enterrar cables [5, 7].

2. Los ROV de tipo “observadores” son vehículos más pequeños que un ROV de trabajo, estos también pueden realizar trabajos dentro del mar, y especialmente utilizados en zonas en donde aún no se puede llegar. Este tipo de vehículos equipan un manipulador de pinza y suelen ser utilizados para la inspección de tuberías, recuperación de tesoros o inspección de barcos. Son ampliamente utilizados por su bajo costo además de requerir poco personal para su manejo [5, 7].
3. Y por último están los ROV “Mini” y “Micro” que como dicen sus nombres son vehículos de tamaño y peso reducido en comparación a un ROV de tipo “General”. Estos pueden variar su peso desde los 3 kg hasta los 15 kg. Estos son usualmente utilizados por buzos cuando existen zonas inaccesibles para este. Su principal ventaja es que por su reducido peso y tamaño además de su fácil control este puede ser transportado y utilizado por una sola persona [5, 7].

Por otra parte, los AUV son vehículos submarinos que funcionan sin la necesidad de la intervención de un operador ya que estos vehículos no tienen conexión física con el operador, esto significa que estos vehículos llevan consigo su propia fuente de energía además de que pueden guiarse sin intervención humana. Por ejemplo en la Figura 1.3 se muestra un mini-submarino de tipo multipropósito, el cual se encarga de explorar las profundidades de océanos.



Figura 1.3: Mini-Submarino Tipo AUV, este vehículos submarino autónomo (AUV) funciona con energía solar. La cantidad de potencia disponible y el peso de la fuente de alimentación son factores importantes para los diseñadores AUV y usuarios. Imagen cortesía de AUVfest 2008 [7].

Usualmente este tipo de vehículos son utilizados para realizar misiones submarinas como el detectar naufragios, rocas u obstrucciones con el fin de generar mapas que puedan ser utilizados para la navegación comercial o navegación recreativa. Una vez completada la misión, el AUV tiene la capacidad de retornar a una localización preestablecida mediante sus propios medios y así se podrá descargar y procesar toda la información obtenida durante el recorrido.

Los AUV, dependiendo del uso que se les tiene planeado, pueden llegar a ser dispositivos ligeros y pesar menos de 50 kg y en algunos casos pueden llegar a ser mucho más pesados, lo que implica que requieren varios sistemas externos de apoyo. Estos vehículos pueden ser equipados con diversos sistemas de sonares o sensores oceanográficos. Entre sus principales aplicaciones incluyen:

- Inspección submarina,

- Inspección de tuberías,
- Inspección de cables,
- Monitoreo Ambiental,
- Fotografía Submarina.

Aunque esta tecnología lleva varios años en funcionamiento, solo hasta hace poco se ha mostrado interés para su uso en la industria de la extracción petrolera por lo que se espera que estos sean una opción comercial [7, 11, 12].

1.2. Modelo dinámico genérico de un submarino

El modelo dinámico del minisubmarino puede ser deducido por medio de varias formulaciones con un enfoque Lagrangiano, Hamiltoniano y Newton-Euler(golstein). Un modelo genérico para un Minisubmarino ha sido desarrollado por Fossen etal, en base a la formulación de Newton-Euler, que se basa en las siguientes expresiones:

$$\frac{d\mathbf{P}_c}{dt} = \mathbf{f}_c, \quad (1.1)$$

$$\frac{d\mathbf{h}_c}{dt} = \mathbf{m}_c, \quad (1.2)$$

donde la primera ecuación es la segunda ley de Newton que expresa la variación del momento lineal del centro de masas de minisubmarino y la segunda expresión es conocida como la ecuación de Euler que nos muestra la variación del momento angular. En estas expresiones $\mathbf{P}_c$ es el vector momento lineal del centro de masas del minisubmarino, $\mathbf{f}_c$ es la fuerza resultante de fuerzas ambientales y de los actuadores que actúan sobre el minisubmarino, $\mathbf{h}_c$ es el vector del momento angular resultante que actúa sobre el prototipo y $\mathbf{m}_c$ es el vector par resultante debido a todas las fuerzas ambientales y de los actuadores actuando sobre la planta. Tomando como hipótesis que el submarino tiene forma elipsoidal, que la tierra es plana, trabajando a una profundidad de 2 m en aguas tranquilas.

De esta manera al emplear las ecuaciones (1.1) y (1.2), se obtienen las ecuaciones dinámicas que describen el movimiento del minisubmarino [12]:

$$m[\dot{u} - vr + \dot{w}q - xG(q^2 + r^2) + yG(pq - \dot{r}) + zG(pr + \dot{q})] = X, \quad (1.3)$$

$$m[\dot{v} - wp + \dot{u}r - yG(r^2 + p^2) + zG(qr - \dot{p}) + xG(qp + \dot{r})] = Y, \quad (1.4)$$

$$m[\dot{w} - uq + \dot{v}p - zG(p^2 + q^2) + xG(rp - \dot{q}) + yG(rp + \dot{p})] = Z, \quad (1.5)$$

$$I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K, \quad (1.6)$$

$$I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M, \quad (1.7)$$

$$I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N, \quad (1.8)$$

donde X, Y, Z son las fuerzas ambientales y de los actuadores que experimenta el minisubmarino y K, M, N son los pares aplicados generados por las fuerzas en (1.6) (1.7) y (1.8) aparecen

parámetros que caracterizan al sistema y que son los momentos de inercia lo largo de los ejes principales de simetría I_x, I_y, I_z . En la expresión (1.6) (1.7) y (1.8) modelo genérico de un vehículo bajo el agua, $[u, v, w]$ son los componentes de la velocidad lineal del sistema de referencia que se a anclado en el minisubmarino, mientras $[p, q, r]$ son los componentes de la velocidad angular del sistema de referencia en el minisubmarino respecto al sistema inercial, y finalmente $[X_G, Y_G, Z_G]$, son las coordenadas del centro de gravedad con respecto al sistema inercial.

Para la formación del modelo matemático del minisubmarino hacemos las siguientes consideraciones:

- El minisubmarino se representa por un Elipsoide. Fuerzas que actúan sobre un vehículo bajo el agua semiejes a, b y c , como se muestra en la Figura 1.4.
- Fijo a la tierra consideramos el sistema X, Y, Z como inercial.
- Fijo al cuerpo consideramos el sistema $[X_o, Y_o, Z_o]$, ver 1.4.

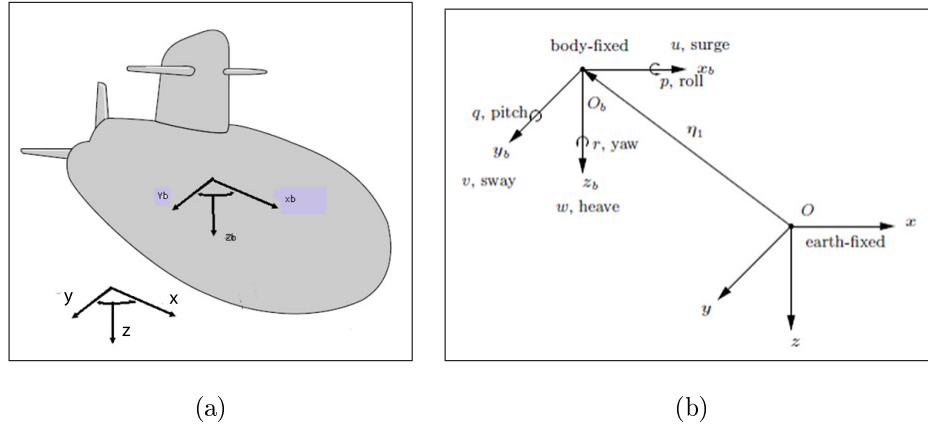


Figura 1.4: Sistema fijo al cuerpo e Inercia [14]. (b) Sistema de referencia de movimiento de un vehículo [6]

		Fuerzas y mo- men- tos		
			v_1, v_2	n_1, n_2
movimiento en la dirección x	oleaje (surge)	X	u	x
movimiento en la dirección y	balanceo (sway)	Y	v	y
movimiento en la dirección z	tirón (heave)	Z	w	z
rotación en el eje x	rodar (roll)	K	p	ϕ
rotación en el eje y	inclinarse (pitch)	M	q	θ
rotación en el eje z	derrape (yaw)	N	r	ψ

Tabla 1.1: Notación común para el movimiento de vehículos marítimos

1.3. Fuerzas que actúan sobre un vehículos bajo el agua

Las perturbaciones ambientales pueden afectar el movimiento y estabilidad de un vehículos, es por eso que en esta sección se narran algunas de las fuerzas que influyen en un minisubmarino.

1.3.1. Fuerzas ambientales que actúan sobre el minisubmarino

1. *Fuerza de flotación.* F_f : esta se calcula en base al principio de Arquímedes. "La flotación es igual al peso del líquido desalojado por el cuerpo sumergido (minisubmarino)". Y que se expresa de la siguiente manera:

$$F_f = m_l g, \quad (1.9)$$

Donde m_l es la masa del líquido desalojado por el cuerpo sumergido, g es la aceleración gravitacional que experimenta un cuerpo en caída libre. La masa del líquido desalojado se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$m_l = V_s \rho_f, \quad (1.10)$$

Donde V_s es el volumen del cuerpo sumergido, ρ_f es la densidad del fluido.

Estabilidad vertical y de Flotación. La estabilidad de un cuerpo parcial o totalmente sumergido es vertical y obedece al equilibrio existente entre el peso del cuerpo $\vec{w}$ y la fuerza de flotación $\vec{F}_f$. Ambas fuerzas son verticales y actúan a lo largo de la misma línea. La fuerza de flotación estará aplicada en el centro de flotación (CF) y el peso estará aplicado en el centro de gravedad (CG). ver Figura 5.

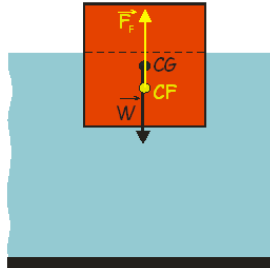


Figura 1.5: $\vec{F}_f = W$ (en el equilibrio) [13]

La estabilidad de un cuerpo parcial o totalmente sumergido es de dos tipos:

- Estabilidad lineal.* Se pone de manifiesto cuando desplazamos el cuerpo verticalmente hacia arriba. Este desplazamiento provoca una disminución del volumen de fluido desplazado cambiando la magnitud de la fuerza de flotación correspondiente. Como se rompe el equilibrio existente entre la fuerza de flotación y el peso del cuerpo $F_f = W$, aparece una fuerza restauradora de dirección vertical y sentido hacia abajo que hace que el cuerpo regrese a su posición original, restableciendo así el equilibrio. De la misma manera, si desplazamos el cuerpo verticalmente hacia abajo, aparecerá una fuerza restauradora vertical y hacia arriba que tenderá a devolver el cuerpo a su posición inicial. En este caso el centro de gravedad y el de flotación permanecen en la misma línea vertical.
- Estabilidad rotacional.* Este tipo de estabilidad se pone de manifiesto cuando el cuerpo sufre un desplazamiento angular. En este caso, el centro de flotación y el centro de

gravedad no permanecen sobre la misma línea vertical, por lo que la fuerza de flotación y el peso no son colineales provocando la aparición de un par de fuerzas restauradoras. El efecto que tiene dicho par de fuerzas sobre la posición del cuerpo determinará el tipo de equilibrio en el sistema.

- 1) *Equilibrio estable*. Cuando el par de fuerzas restauradoras devuelve el cuerpo a su posición original. Esto se produce cuando el cuerpo tiene mayor densidad en la parte inferior del mismo, de manera que el centro de gravedad se encuentra por debajo del centro de flotación.

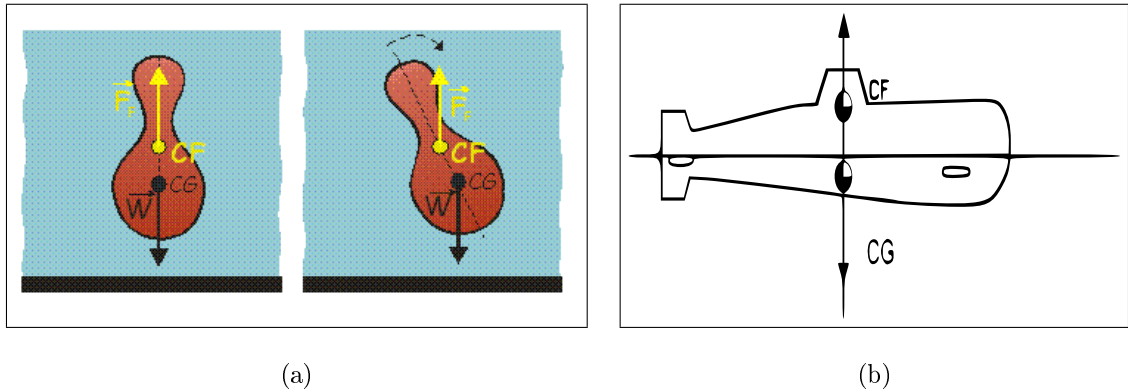


Figura 1.6: (a) Equilibrio estable [13]. (b) Fuerzas actuando en un minisubmarino [6]

- 2) *Equilibrio inestable*: cuando el par de fuerzas tiende a aumentar el desplazamiento angular producido. Esto ocurre cuando el cuerpo tiene mayor densidad en la parte superior del cuerpo, de manera que el centro de gravedad se encuentra por encima del centro de flotación.

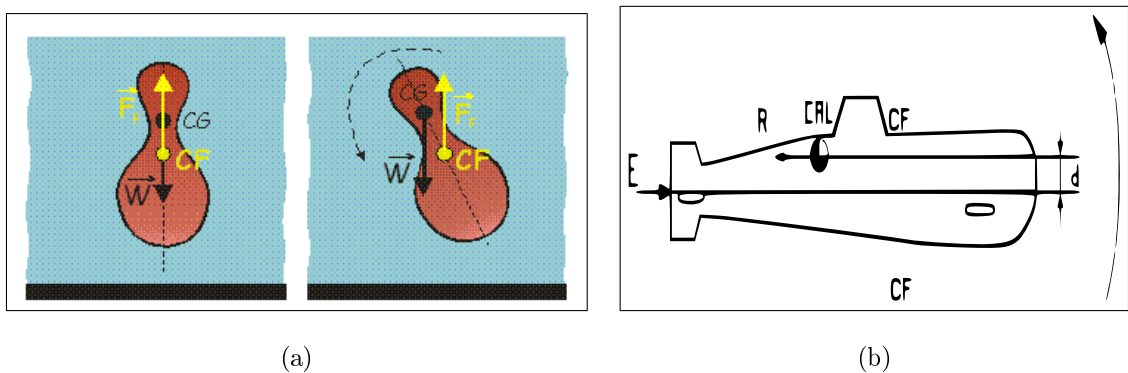


Figura 1.7: (a) Equilibrio inestable [13]. (b) Fuerzas actuando en un minisubmarino [6]

- 3) *Equilibrio neutro*: cuando no aparece ningún par de fuerzas restauradoras a pesar de haberse producido un desplazamiento angular. Podemos encontrar este tipo de equilibrio en cuerpos cuya distribución de masas es homogénea, de manera que el centro de gravedad coincide con el centro de flotación.
- c) *Estabilidad de cuerpos prismáticos*. Hay ciertos objetos flotantes que se encuentran en equilibrio estable cuando su centro de gravedad está por encima del centro de

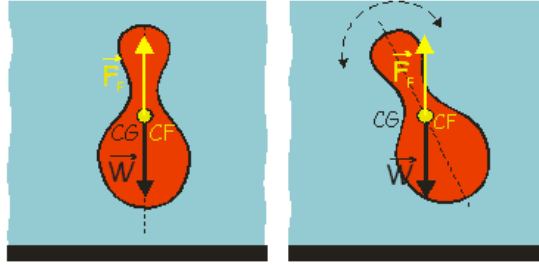


Figura 1.8: Equilibrio neutro [13]

flotación. Esto entra en contradicción con lo visto anteriormente acerca del equilibrio, sin embargo este fenómeno se produce de manera habitual, por lo que vamos a tratarlo a continuación.

Vamos a considerar la estabilidad de cuerpos prismáticos flotantes con el centro de gravedad situado encima del centro de flotación, cuando se producen pequeños ángulos de inclinación.

La siguiente figura muestra la sección transversal de un cuerpo prismático que tiene sus otras secciones transversales paralelas idénticas. En el dibujo podemos ver el centro de flotación CF , el cual está ubicado en el centro geométrico (centroide) del volumen sumergido del cuerpo (V_d). El eje sobre el que actúa la fuerza de flotación $\vec{F}_f$ está representado por la línea vertical AA que pasa por el punto CF .

Vamos a suponer que el cuerpo tiene una distribución de masas homogénea, por lo que el centro de gravedad CG estará ubicado en el centro geométrico del volumen total del cuerpo (V). El eje vertical del cuerpo está representado por la línea BB' y pasa por el punto CG .

Cuando el cuerpo está en equilibrio, los ejes AA' y BB' coinciden y la fuerza de flotación y el peso actúan sobre la misma línea vertical, por tanto son colineales, como muestra la figura 1.9.

Ahora inclinamos el cuerpo un ángulo pequeño en sentido contrario a las agujas del reloj. Se muestra en la Figura 1.8, el volumen sumergido habrá cambiado de forma, por lo que su centroide CF habrá cambiado de posición. Se puede observar también que el eje AA sigue estando en dirección vertical y es la línea de acción de la fuerza de flotación.

Por otro lado, el eje del cuerpo BB que pasa por el centro de gravedad CG habrá rotado con el cuerpo. Ahora los ejes AA y BB ya no son paralelos, sino que forman un ángulo entre sí igual al ángulo de rotación. El punto donde intersectan ambos ejes se llama METACENTRO (M). En la figura siguiente podemos ver que el metacentro se encuentra por encima del centro de gravedad y actúa como pivote o eje alrededor del cual el cuerpo ha rotado.

A partir de la figura 1.9, la fuerza de flotación actúa verticalmente en el centroide CF y a lo largo del eje AA' , mientras que el peso actúa sobre el centro de gravedad CG y también en dirección vertical. En esta configuración ambas fuerzas no son colineales,

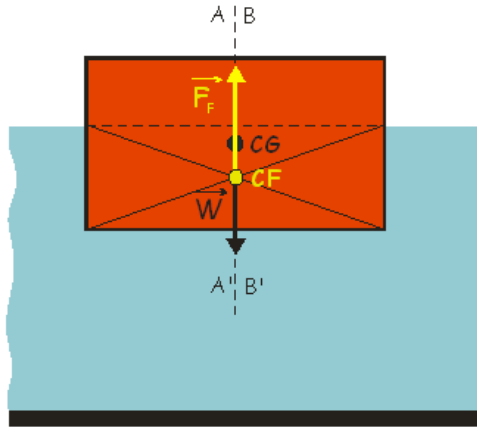


Figura 1.9: Cuerpo en equilibrio [13]

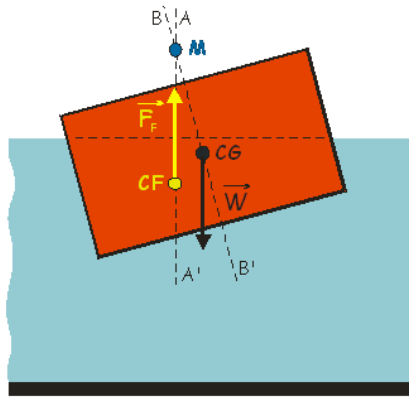


Figura 1.10: Metacentro [13]

por lo que actúan como un par de fuerzas restauradoras que hacen girar el cuerpo en sentido contrario a la rotación producida en un principio, devolviendo al cuerpo a su posición inicial. Se dice entonces que el cuerpo se encuentra en equilibrio estable.

Si la configuración del cuerpo es tal que la distribución de masas no es homogénea, la ubicación del metacentro puede cambiar. Por ejemplo, se considera un cuerpo prismático cuyo centro de gravedad se encuentre sobre el eje vertical del cuerpo BB pero descentrado, como indica la siguiente figura.

Cuando se inclina el cuerpo, puede ocurrir que el metacentro (M) esté ubicado ahora por debajo del centro de gravedad. Como el metacentro actúa de eje de rotación alrededor del cual el cuerpo gira, el par de fuerzas actúan como un par de fuerzas restauradoras, se hace girar el cuerpo en el mismo sentido en el que se realizó la rotación y dándole la vuelta, sin alcanzar la posición que tenía inicialmente. Se dice entonces que el cuerpo presenta equilibrio inestable.

En resumen, cuando el metacentro (M) se encuentra por encima del centro de gravedad CG , el cuerpo presenta equilibrio estable. Cuando el metacentro se encuentra por

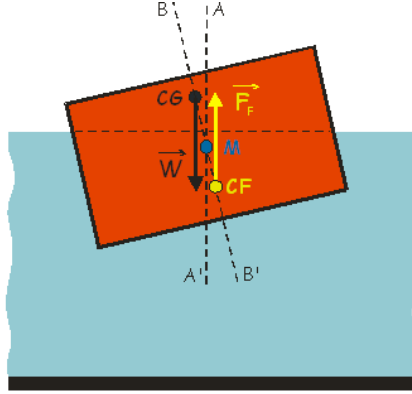


Figura 1.11: Cuerpo prismático cuyo centro de gravedad se encuentre sobre el eje vertical del cuerpo [13]

debajo de CG el equilibrio es inestable; y cuando el metacentro coincide con CG, está en equilibrio neutro.

La distancia entre el metacentro y el centro de flotación se conoce como “altura meta-céntrica” y es una medida directa de la estabilidad del cuerpo. Esta distancia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\vec{MF} = \frac{I}{V_d}, \quad (1.11)$$

donde I es el momento de inercia de la sección horizontal del cuerpo flotante y V_d es el volumen de fluido desplazado por el cuerpo.

2. *Fuerza de gravedad.* Es la fuerza que ejerce la tierra sobre cualquier objeto que está a su alrededor y el modelo más sencillo es masa por gravedad esta expresión es válida para alturas pequeñas en comparación con el radio de la tierra (6500 Km aproximadamente), esta fuerza es conocida como el peso de un objeto, y esta dada por:

$$F_p = m_s g. \quad (1.12)$$

3. *Fuerza de masa añadida.* En mecánica de fluidos esta fuerza es conocida como la inercia añadida a un sistema porque un cuerpo acelerando o desacelerando debe mover algún volumen del fluido que lo rodea cuando este se mueve a través de él. Masa añadida es un tema común porque el objeto y el fluido que lo rodea no pueden ocupar el mismo espacio físico simultáneamente. Por simplicidad esta puede ser modelada como algún volumen del fluido que se mueve con el objeto, se piensa en realidad “Todo” el fluido debe ser acelerado [15]. Puede ser mostrado que la fuerza de masa añadida, para una partícula esférica sumergida en un líquido no viscoso esta dada por:

$$F_a = \frac{\rho_f V_p}{2} \left(\frac{Du}{Dt} \frac{dv_p}{dt} \right), \quad (1.13)$$

donde los símbolos en negrita denotan vectores, u es la velocidad del flujo, v_p es la velocidad de la partícula esférica, ρ_f es la densidad del fluido, V_p es el volumen de la partícula sumergida, y $\frac{D}{Dt}$ ese símbolo denota la derivada material.

El origen de la noción de masa añadida se vuelve evidente cuando vemos a la ecuación de momento de una partícula.

$$m_a \frac{dv_p}{dt} = \sum F_i \frac{\rho_f V_p}{2} \frac{Du}{Dt} \quad (1.14)$$

Donde $\sum F_i$ es la suma de todas las otras fuerzas, que actúan sobre la partícula, tal como la gravedad, la fuerza de arrastre, etc. Se cambia la derivada de la velocidad de la partícula desde el lado derecho al lado izquierdo obtenemos:

$$(m_a + \frac{\rho_f V_p}{2}) \frac{dv_p}{dt} = \sum F_i \frac{\rho_f V_p}{2} \frac{Du}{Dt}, \quad (1.15)$$

de este modo la partícula es acelerada como si tuviera una masa añadida a la mitad del fluido que este desplaza, y hay también una contribución de fuerza adicional en el lado derecho debido a la aceleración del fluido. La masa añadida puede ser incorporada en la mayoría de ecuaciones físicas, se considera una masa efectiva como la suma de la masa y la masa añadida. Esta suma es conocida como “masa virtual”. Para un fluido en reposo el segundo término del lado derecho de la ecuación de arriba desaparece de manera que la segunda ley de Newton se puede escribir como:

$$F_p = (m_p + \frac{\rho_f V_p}{2}) a_p, \quad (1.16)$$

uno puede demostrar que la masa añadida de una esfera es: $\frac{2}{3}\pi r^3 \rho_f$. Para un cuerpo en general, la masa añadida se convierte en un tensor (referido como el tensor de masa inducida), con las componentes dependen de la dirección de movimiento del cuerpo. No todos los elementos en el tensor de masa añadida tendrán una dimensión de masa [14], [15].

4. *Fuerza viscosa*: estas fuerzas son el resultado de la fricción que ejerce la viscosidad del fluido sobre el cuerpo, como se observa en la Figura 1.12. Se suelen clasificar según el efecto sobre el cuerpo en: fuerza de arrastre y fuerza de sustentación. El arrastre es la fuerza sobre el cuerpo provocada por el fluido que resiste el movimiento en la dirección del recorrido del cuerpo. La sustentación es la fuerza provocada por el fluido en dirección perpendicular a la dirección del cuerpo recorrido [15].

$$F_v = -\mu \eta v_p, \quad (1.17)$$

donde μ es el coeficiente de fricción, η es la viscosidad del medio v_p es la viscosidad del prototipo. Para determinar la fuerza viscosa en objetos más complicados se usa la siguiente ecuación:

$$F_v = -C_u v_p, \quad (1.18)$$

en la cual C_u es el coeficiente de arrastre, el cual se determina de manera experimental y v_p como se menciona anteriormente es la velocidad del prototipo.

Otras fuerzas son la de corrientes marinas, fuerzas de oleaje en la superficie, estas son más difíciles de explicar y modelar.

1.3.2. Fuerza de una propela

Todos los vehículos minisubmarinos usan propelas para obtener velocidad de avance. Para el sistema de control básico de un vehículos submarino, el modelado de las propelas es requerido, y la fuerza de empuje es un factor muy importante para modelar la propela. Frecuentemente, se utiliza un modelo matemático sencillo del impulsor en el que la fuerza del impulsor es proporcional al cuadrado de la velocidad angular de la hélice, y a su vez esta velocidad es proporcional al voltaje del motor. Lo anterior bajo el supuesto que la dinámica de los impulsores tienen unas constantes de tiempo mucho menores que la dinámica de los vehículos (Yuh, 2000).

$$\tau = -C_u \theta. \quad (1.19)$$

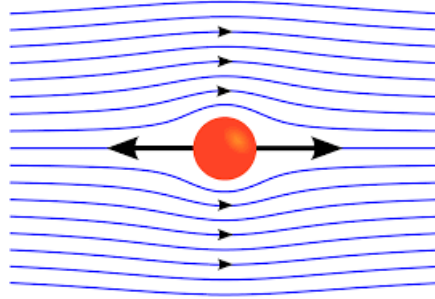


Figura 1.12: Fuerza viscosa. Muestra la interacción de las fuerzas en una partícula dentro de un fluido.

1.4. Elementos electromecánicos

En la actualidad existen dos maneras diferentes de sumergir un submarino, de manera estática y de manera dinámica. Varios modelos de submarinos y de minisubmarinos hacen uso de un sistema dinámico de inmersión, mientras que mayoritariamente los submarinos militares hacen uso de sistemas estáticos de inmersión y en algunas ocasiones la combinación de ambos.

Inmersión Estática. Puede modificar la flotabilidad de un submarino mediante la introducción de agua en sus tanques de lastre. Estos tanques pueden estar ubicados de tres maneras diferentes como se muestra en la Figura 1.13.

- Dentro del casco presurizado.
- Fuera del tanque presurizado como tanques adicionales.
- Entre el casco exterior y el casco presurizado.

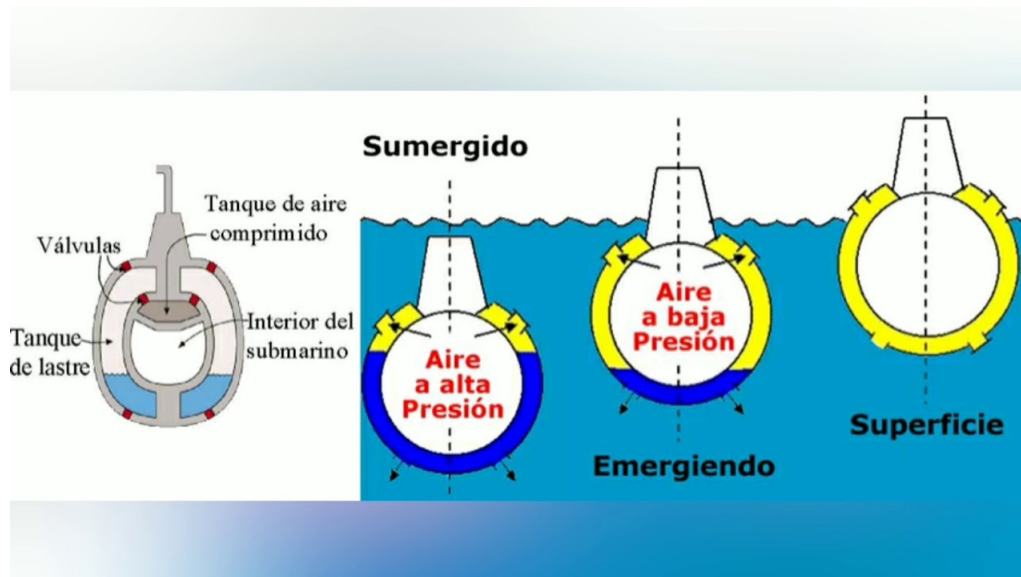


Figura 1.13: Tanque de lastre en un submarino doble casco. [8]

Una de las principales desventajas de tener el tanque dentro del casco es el espacio que ocupa, ya que este podría ser ocupado para más personal o equipamiento. En este trabajo de tesis vamos

a emplear el tipo de inmersión estática número uno.

Inmersión Dinámica. Los sistemas de inmersión dinámica son los más comúnmente existentes en la actualidad en diversos tipos de submarinos.

Los submarinos que aplican este método para sumergirse cuentan con una flotabilidad inherente en su construcción, por lo que en caso de dejar de aplicar control sobre estos ocasionará que regresen a la superficie.

En la actualidad existen distintos tipos de tanques de lastre, para este trabajo se enfocará específicamente en los siguientes tipos:

- Tanque de lastre a presión
- Tanque de lastre de pistón

Dos estrategias de inmersión estática son las siguientes:

1. *Tanque de lastre a presión.* El tanque de lastre a presión se compone de un deposito sellado capaz de permanecer con un aumento de presión significativo, Figura 1.14. Para llenar el tanque, se bombea agua dentro del tanque con una bomba de alta presión. Como el tanque no tiene una válvula para liberar el aire dentro del tanque, este se comprime. Para poder vaciar el tanque, la bomba funciona en sentido contrario con el fin de sacar el agua de tanque. Por la razón de que el aire dentro del tanque es comprimida, el tanque no puede ser llenado por completo, solo aproximadamente al 80 de su capacidad.

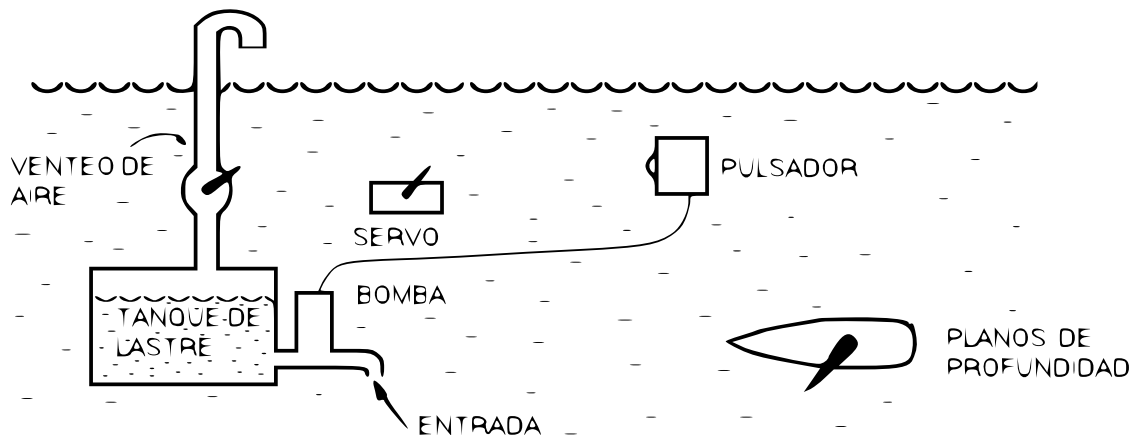


Figura 1.14: Tanque de lastre a presión. [8]

2. *Tanque de lastre de pistón.* El tanque de lastre de pistón consiste en un cilindro y un pistón movable haciendo semejanza a una jeringa. El pistón se puede mover de manera lineal con un tornillo, una rueda dentada y un motor, ver figura 1.15. La parte contraria del pistón está conectada a la parte externa del submarino. Al hacer girar el motor en un sentido el pistón empezará a moverse y a succionar agua con el fin de llenar el tanque. Al hacer esto, habrá una compresión de aire en el lado opuesto a la parte a llenar. Por eso mismo este tanque es similar al tanque a presión, ya que esta aumentara considerablemente.

En la Tabla 1.2 se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de los dos métodos de inmersión estática, por medio de una bomba y un pistón.

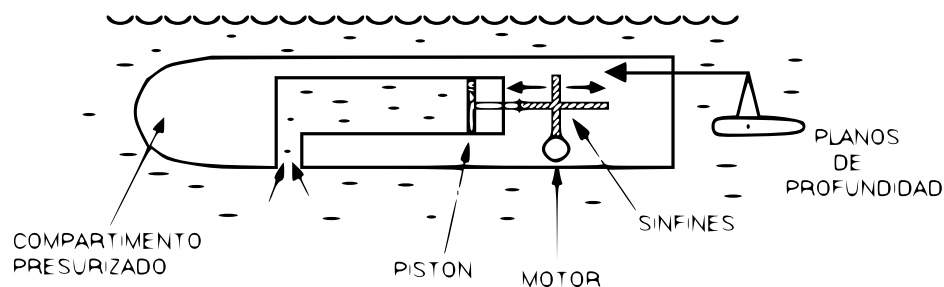


Figura 1.15: Tanque de lastre de pistón. [8]

Tipo de lastre	Ventajas	Desventajas
Tanque de lastre a presión	■ Puede sumergirse verticalmente sin necesidad de alguna velocidad de avance. ■ El control puede ser mas preciso.	■ El contenedor debe ser mas resistente por las altas presiones. ■ Al adquirir más energía para bombear, esto disminuye la energía de las baterías.
Tanque de lastre de pistón.	■ Puede sumergirse verticalmente sin necesidad de alguna velocidad de avance. ■ El control puede ser más preciso. ■ El control puede ser mas preciso. ■ Costo más reducido en comparación al tanque de lastre a presión.	■ El contenedor debe ser mas resistente por las altas presiones. ■ Mayor desgaste al ser un sistema más mecánico. ■ Posible presencia de fugas de agua.

Tabla 1.2: Tipos de tanque de lastre

1.5. Propelas

Es un elemento formado por una serie de dispositivos que se denominan aspas o álabes, dispuestos de forma concéntrica sobre un eje y que giran alrededor de este en un mismo plano. Gracias a sus aspas pueden transmitir su energía cinética, creada al girar los álabes, en un fluido líquido o gas de manera que se crea una fuerza de tracción o empuje a lo largo del eje de rotación. Las primeras propelas empleadas se usaron hace miles de años y fueron para los molinos de viento y de agua. Actualmente, las propelas y todos sus dispositivos se usan para muchas cosas, pasando por

un simple sistema de refrigeración hasta la generación de electricidad o la propulsión de medios de transporte, como el barco. La utilización de la propela es muy amplia y su denominación y aplicación es muy variada, como sus aspas, que han adquirido diferentes formas según el propósito que tengan. Ha quedado demostrado que mientras más grande sean, mejor trabajará. En el sistema propulsivo de un buque las propelas marinas y el fenómeno de la cavitación, la mayoría de las veces el problema reside en encontrar un equilibrio entre el tamaño de la propela y la capacidad del motor para hacerla girar. El tamaño de la propela está condicionado por dos factores: su diámetro total y el peso de las palas (inclinación de las palas y capacidad de impulsar agua). Un diámetro pequeño está asociado a un motor de pequeña potencia [16].

Las partes de la Propela son:

- Eje: barra donde se monta la hélice y que la hace girar.
- Núcleo: cuerpo central donde no afirman el eje a las aspas.
- Capucete: pieza en forma de capuchón que protege el agujero para que no entre agua.
- Aspa: piezas que salen del núcleo. Produce empuje de la embarcación mediante el giro.

1.5.1. Diferentes tipos de propelas

Existen diferentes clasificaciones de propelas o hélices, las cuales dependen del medio en el cual se manejan ya sea aire o agua. De acuerdo a sus aplicaciones se pueden dividir principalmente en 4 diferentes tipos:

- Hélices para molinos. Los molinos aún son utilizados como generadores de energía, en el diseño de estos prototipos es importante tomar en cuenta las características para la hélice. Aunque existen dos tipos de molinos, eje horizontal y eje vertical, el principio de la operación es esencialmente el mismo así como su clasificación diversa. La captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las aspas, las cuales están unidas al eje a través de un elemento denominado rotor. El principio aerodinámico, por el cual este conjunto gira, es similar al que hace que los aviones vuelen [16].

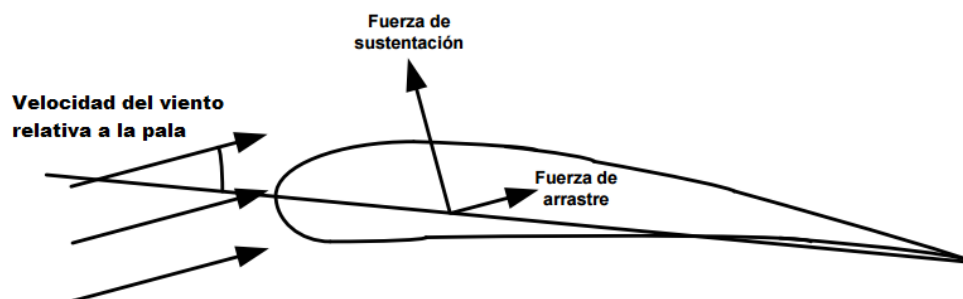


Figura 1.16: Fuerzas de sustentación y arrastre. [17]

Según este principio, el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior de una placa o perfil inclinado (ver Figura 1.16) genera una diferencia de presiones entre ambas caras, dando origen a una fuerza resultante (R) que actúa sobre el perfil. Descomponiendo esta fuerza en dos direcciones se obtiene:

- La fuerza de sustentación (s), o simplemente sustentación, de dirección perpendicular al viento.

- La fuerza de arrastre (a), de dirección paralela al viento.

Para favorecer la circulación del aire sobre la superficie de las aspas, evitar la formación de torbellinos y maximizar la diferencia de presiones, se eligen perfiles de aspa con formas convenientes desde el punto de vista aerodinámico. Según como estén montadas las aspas con respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par motor será predominantemente la fuerza de arrastre o la de sustentación. Como la fuerza de sustentación es la única que dará origen al par o cupla motora habrá que diseñar el perfil y ubicar las aspas dándole un ángulo de ataque (α) que haga máxima la relación fuerza de sustentación/fuerza de arrastre, ver Figura 1.16.

Este análisis simple es solo válido cuando las aspas de un molino están en reposo. Al permitir el giro del rotor, la fuerza resultante sobre las aspas será el resultado de la combinación de la acción directa del viento real (U en la Figura 1.17) y la acción del "viento" (V en la Figura 1.18) creado por las propias aspas al girar. Dicho con otras palabras, el viento que "ven" las aspas no es más el viento real (U) sino el llamado viento aparente (V_r), resultante de la composición de los vectores V y U . Como cada sección de una aspa tiene velocidad diferente del viento aparente también varía en el sentido longitudinal; por lo tanto, una aspa ideal deberá presentar un ángulo de incidencia diferente a lo largo de toda su longitud, efecto que se logra dándole un alabeo. Asimismo, y también porque las velocidades son más altas al acercarnos a la punta de aspa, el perfil podrá tener menores dimensiones para obtener la misma fuerza resultante. Estas consideraciones son particularmente importantes en máquinas de gran tamaño. En molinos pequeños, por razones de simplicidad y fundamentalmente costos, se acostumbra optar por aspas de sección constante y sin alabeo.

- Hélices para aeroplanos. Los perfiles aerodinámicos que componen una hélice están sujetos a las mismas leyes y principios que cualquier otro perfil aerodinámico, por ejemplo un ala. Cada uno de estos perfiles tiene un ángulo de ataque, respecto al viento relativo de la aspa que en este caso es cercano al plano de revolución de la hélice, y un paso (igual al ángulo de incidencia), como se muestra en la Figura 1.19.

El giro de la hélice, que es como si se hicieran rotar muchas pequeñas alas, acelera el flujo de aire hacia el borde de salida de cada perfil, (lo mismo que sucede en un ala). Este proceso da lugar a la aceleración hacia atrás de una gran masa de aire, movimiento que provoca una fuerza de reacción que es la que propulsa el avión hacia adelante.

Las hélices se fabrican con "torsión", cambiando el ángulo de incidencia de forma decreciente desde el eje (mayor ángulo) hasta la punta (menor ángulo). Al girar a mayor velocidad el extremo que la parte más cercana al eje, es necesario compensar esta diferencia para producir una fuerza de forma uniforme. La solución consiste en disminuir este ángulo desde el centro hacia los extremos, de una forma progresiva, y así la menor velocidad pero mayor ángulo en el centro de la hélice se va igualando con una mayor velocidad pero menor ángulo hacia los extremos. Con esto, se produce una fuerza de forma uniforme a lo largo de toda la hélice, reduciendo las tensiones internas y las vibraciones [16].

- Propelas para barcos. Las propelas convierten la energía rotacional generada por el motor en el empuje necesario para el desplazamiento de un barco como se observa en la Figura 1.19. Descontando el diseño de esta, cuanto más grande sea más eficientemente trabajará. El problema radica en conseguir un equilibrio entre este tamaño y la capacidad del motor para hacerla rotar a su régimen de trabajo idóneo. Queda definido por dos datos; El diámetro total



Figura 1.17: a) Efectos del viento sobre un elemento de aspa (pala) [17]

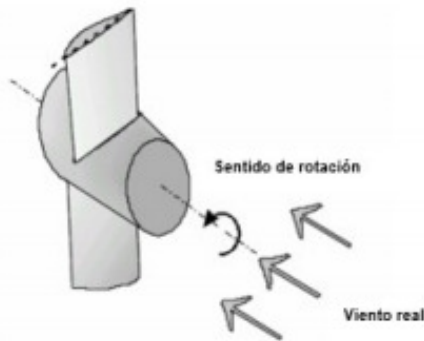


Figura 1.18: b) Viento aparente. [17]

de la propela y el paso de sus aspas, es decir lo inclinado que están y por tanto la capacidad de impulsar agua. Estos dos datos son los más importantes para diferenciar una propela de otra [16].

Generalmente un diámetro pequeño se corresponde con un motor de pequeña potencia, o con un barco diseñado para desplazarse a mucha velocidad.

El paso de la Propela se corresponde con el avance teórico que genera la propela al girar esta una vuelta. Puesto que el agua es un medio no sólido y por tanto se producen rozamientos y deslizamientos, el avance real será siempre a regímenes de funcionamiento óptimos, algo inferior al teórico [16].

- Propelas para submarinos. Los submarinos utilizan propelas y aletas en su cola para poder moverse en ciertas direcciones. Estas suelen ser potenciadas con energía eléctrica y diésel para los modelos más pequeños, y energía nuclear para los submarinos grandes.

Una propela perfecta debería pesar lo mínimo, ser lo más rígida posible, no verse alterada por el entorno marino y poderse reparar con facilidad. Por todo ello un material muy indicado (si no fuera por su elevado precio y dificultad para trabajarlo y repararlo) sería

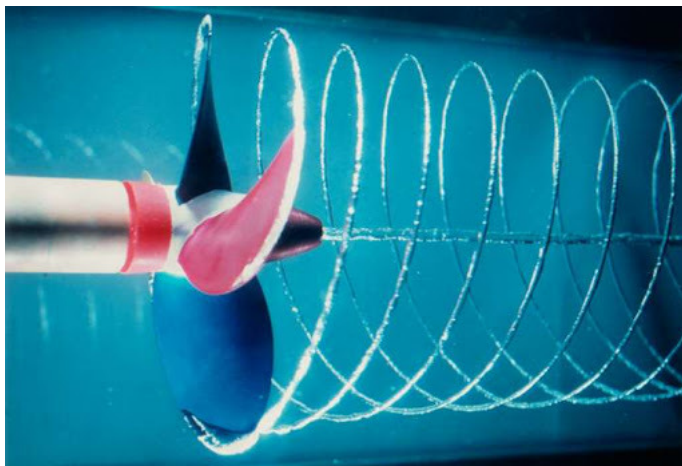


Figura 1.19: Propela en movimiento, generando una fuerza de empuje con el agua. [18]

el Titanio, que es totalmente inmune a la oxidación y liviano. Existen distintas aleaciones adecuadas para la fabricación de propelas pero las investigaciones en materiales compuestos son prometedoras. Además de ser totalmente inmunes a la oxidación y muy livianas, las propelas tienen un comportamiento frente al impacto muy diferente que las de metal. El daño queda localizado solo en la zona del golpe, sin comprometer todo el eje o la reductora como a veces ocurre con las propela de metal.

En cualquier propela es importante tener suficiente superficie de aspás, capaz de distribuir la potencia del motor entre ellas, para tener una superficie suficiente para desplazar todo el volumen de agua que la potencia del motor permita.

Tipo de propelas o hélices	Número de aspás	Ancho de aspás	ángulo de ataque
Aerogeneradores	2	24 cm	3° y 10°
Aviones	2	A partir de 1 metro	No especificado
Barcos	3 o 4	Dependerá del número de aspás	No especificado
Minisubmarino	3 a 5	Proporcional al tamaño de la propela	No especificado

Tabla 1.3: Características de las propelas por su uso.

Aspas demasiado pequeñas causan cargas muy altas, lo que significa que la propela no es capaz de absorber toda la potencia transferida por el motor. El resultado es lo que conocemos como cavitación, vibraciones y en algunos casos extremos, picaduras en las aspás. En la Tabla 1.3 se hace un resumen de las características principales de los 4 tipos de propelas.

1.5.2. Parámetros para elegir una propela

Número de aspás. En general, a una velocidad determinada de rotación del eje, cuanto menos aspás tenga una propela, mejor será. Sin embargo, si tiene menos aspás, cada una de ellas soportará una

carga mayor. Esto puede causar mucha vibración, sobre todo en una propela de dos aspas, y contribuir a la cavitación (fenómeno que ocurre al pasar un fluido en estado líquido a gran velocidad por una arista afilada produciendo una descompresión del fluido) aumentar mas información sobre estos efectos . Cuando el diámetro de la hélice está limitado por el tamaño del vano, será preferible que el eje gire a menos revoluciones y la fuerza se absorba con un número mayor de palas [16].

Superficie de la aspas. Una propela con aspas angostas resulta más eficiente que una propela con aspas anchas [19]. Sin embargo, las hélices con una relación baja de la superficie de las aspas son más propensas a la cavitación, porque el empuje de la hélice se distribuye sobre una superficie más pequeña de las palas. Para prevenir la cavitación, la relación de la superficie de las palas debe ser mayor que el valor más eficiente, en la Figura 1.20 se muestran diferentes tamaños de aspas en la propela [16].

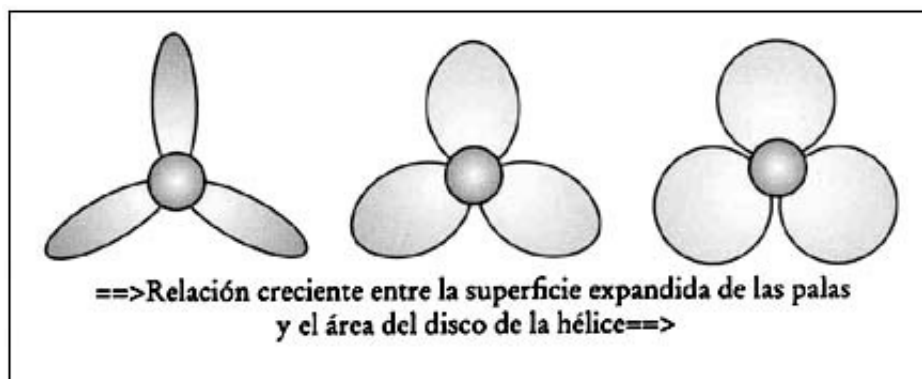


Figura 1.20: Relación creciente entre el área de superficie de las aspas y el área del disco de la propela [20]

Espesor de las aspas. El espesor de las aspas de la propela tiene escaso efecto en la eficiencia dentro de los límites necesarios para que las aspas tengan fuerza suficiente. Sin embargo, de forma semejante a la relación de la superficie de las aspas, el espesor de la sección puede incidir en la cavitación: las propelas de aspas más gruesas producen mayor succión agregar más información y son más propensas a la cavitación [16].

Núcleo. El tamaño del núcleo de la propela afecta directamente a la eficiencia de la aspa. Esto es importante si se considera la instalación de una propela de paso variable, cuyo núcleo es mayor que otra propela equivalente de paso fijo. En general, la disminución de la eficiencia debida al mayor tamaño del núcleo de una propela de paso variable es de un 2 aproximadamente. Se observa una pérdida de la eficiencia de una magnitud semejante cuando el núcleo es de mayor tamaño, como en muchas propelas de motores fuera borda, por donde se descargan los gases de escape [16].

Ángulo. Se denomina ángulo de ataque al ángulo que forma la cuerda geométrica de un perfil alar con la dirección del aire incidente. Es un parámetro que influye decisivamente en la capacidad de generar sustentación de un ala o en la capacidad de generar tracción en las aspas de una propela.

Normalmente, al aumentar el ángulo de ataque se incrementa la sustentación hasta un cierto punto en el que esta disminuye bruscamente, fenómeno que se conoce con el nombre de entrada en pérdida. La dependencia de la sustentación con el ángulo de ataque se puede medir a través de un coeficiente de sustentación C_L cuya variación con el ángulo de ataque α se

ilustra en la Figura 1.20. La dependencia teórica para una placa plana viene dada por $C_L(\alpha) = 2\alpha\pi$.

Debido a la interacción directa entre el ángulo de ataque y la sustentación, el control del mismo es el mando primario de un avión o aerodino de ala fija. En efecto, el aumento de la sustentación genera un aumento de la resistencia aerodinámica, que se opone a la tracción aerodinámica. Es decir se produce una reducción de la velocidad aerodinámica. Esto nos lleva a la conclusión de que la regulación primaria de la velocidad en un avión se efectúa mediante la modificación del ángulo de ataque. Hay que destacar que existen ciertos dispositivos hipersustentadores que pueden incrementar el ángulo de ataque de entrada en pérdida, es decir reducir la velocidad de entrada en pérdida.

1.6. Elementos electrónicos

El hardware empleado fue Arduino, una aplicación para android usando bluetooth (electrónica bluetooth) y los sensores que se usaron en su fabricación, el cual se utilizó para el funcionamiento del prototipo y la toma de datos. A continuación se detallan, además de otros que se consideraron y que podrían haber enriquecido su funcionamiento.

1.6.1. Arduino

Arduino es una plataforma electrónica libre, basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se basa simplemente en una placa con un microcontrolador y una serie de pines de entrada/salida, junto con un entorno de desarrollo. Control de navegación con Arduino de un modelo de barco 18. Su éxito se debe no solo a su sencillez, sino también a su carácter open-hardware, que permite no solo crear nosotros mismos nuestra propia versión de Arduino (existen las placas “originales” creadas por la propia comunidad de Arduino, y las “no oficiales” creadas por otra gente pero que guardan muchas similitudes con las originales y son igualmente válidas), sino que además es posible realizar cualquier tipo de proyecto sin tener que obtener ningún tipo de licencia. La versión más básica es el llamado Arduino Uno, ver figura 23, la cual usaremos para nuestro proyecto, ya que por ahora, no usaremos muchos componentes. Arduino UNO es una placa con un microcontrolador de la marca Atmel y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, aunque el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio chip. Un arduino dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales de 0 y 5 V. También dispone de entradas y salidas analógicas. Mediante las entradas analógicas podemos obtener datos de sensores en forma de variaciones continuas de un voltaje. Las salidas analógicas suelen utilizarse para enviar señales de control en forma de señales PWM. Arduino UNO es la última versión de la placa, existen dos variantes, la Arduino UNO convencional y la Arduino UNO SMD. La única diferencia entre ambas es el tipo de microcontrolador que montan [21].

La primera es un microcontrolador Atmega en formato DIP. Y la segunda dispone de un microcontrolador en formato SMD. Se elige la primera porque nos permite programar el chip sobre la propia placa y después integrarlo en otros montajes. Entradas y salidas: Cada uno de los 14 pines digitales se puede usar como entrada o como salida. Funcionan a 5V, cada pin puede suministrar hasta 40 mA. La intensidad máxima de entrada también es de 40 mA. Cada uno de los pines digitales dispone de una resistencia de pull-up interna de entre 20K Ω y 50 K Ω que está desconectada, salvo que se indique lo contrario. Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 bits, [21].

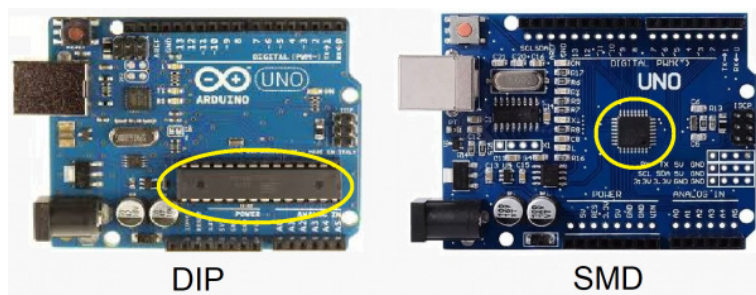


Figura 1.21: a) formato DIP, b) formato SMD, [22]

Pines especiales de entrada y salida:

- R_X y T_X : Se usan para transmisiones serie de señales TTL.
- Interrupciones externas: Los pines 2 y 3 están configurados para generar una interrupción en el atmega. Las interrupciones pueden dispararse cuando se encuentra un valor bajo en estas entradas y con flancos de subida o bajada de la entrada.
- PWM: Arduino dispone de 6 salidas destinadas a la generación de señales PWM de hasta 8 bits. SPI: Los pines 10, 11, 12 y 13 pueden utilizarse para llevar a cabo comunicaciones SPI, que permiten trasladar información full dúplex en un entorno Maestro/Eslavo.
- I²C: Permite establecer comunicaciones a través de un bus I²C. El bus I²C es un producto de Phillips para interconexión de sistemas embebidos. Actualmente se puede encontrar una gran diversidad de dispositivos que utilizan esta interfaz, desde pantallas LCD, memorias EEPROM, sensores [21].

Alimentación de un Arduino. Puede alimentarse directamente a través del propio cable USB o mediante una fuente de alimentación externa, como puede ser un pequeño transformador o, por ejemplo una pila de 9V. Los límites están entre los 6 y los 12 V.

Como única restricción hay que saber que si la placa se alimenta con menos de 7V, la salida del regulador de tensión a 5V puede dar menos que este voltaje y si sobrepasamos los 12V, probablemente dañaremos la placa. La alimentación puede conectarse mediante un conector de 2.1mm con el positivo en el centro o directamente a los pines Vin y GND marcados sobre la placa [21].

1.6.2. Sensores

Es un dispositivo diseñado para captar un estímulo de su entorno y traducir esa información que recibe. Esa información recibida es normalmente convertida a un impulso eléctrico que posteriormente es procesado por una serie de circuitos que generan una acción predeterminada en un aparato, sistema o máquina. Es un artefacto que en algunas aplicaciones transforma una clase de información en otra que se quiere medir o controlar. Los sensores reaccionan a los cambios de las condiciones físicas alterando sus propiedades eléctricas. Por lo tanto, la mayoría de estos dispositivos dependen de sistemas electrónicos para capturar, analizar y transmitir información sobre el medio ambiente. Estos sistemas electrónicos se basan en los mismos principios que los circuitos eléctricos para funcionar, por lo que la capacidad de controlar el flujo de energía eléctrica es muy importante. Es decir, un sensor convierte los estímulos como el calor, la luz, el sonido y el movimiento en señales eléctricas. Estas señales se pasan a través de una interfaz que las convierte en un código binario y lo pasa a una computadora para ser procesado [23].

Las características principales de los sensores son:

1. Rango. Es el valor mínimo y máximo de la variable física que el sensor puede percibir o medir.
2. Amplitud. Es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de entrada.
3. Exactitud. El error en la medición se especifica en términos de precisión. Se define como la diferencia entre el valor medido y el valor real. Se define en términos de % de la escala completa o % de la lectura.
4. Precisión. Se define como la cercanía entre un conjunto de valores y es diferente de la exactitud.
5. Sensibilidad. Es la relación entre el valor de la salida y el valor de la entrada.
6. La alineación. Es la máxima desviación entre los valores medidos de un sensor de la curva ideal.
7. Histéresis. Es la diferencia en la salida cuando la entrada varía de dos maneras, aumentando y disminuyendo.
8. Resolución. Es el cambio mínimo en la entrada que puede ser detectado por el sensor.
9. Reproducibilidad. Se define como la capacidad del sensor de producir la misma salida cuando se aplica la misma entrada.
10. Repetibilidad. Capacidad del sensor de producir la misma salida cada vez que se aplica la misma entrada y todas las condiciones físicas y de medición se mantienen iguales, incluyendo el operador, el instrumento, las condiciones ambientales, etc.
11. Tiempo de respuesta. Se expresa generalmente como el tiempo en que la salida alcanza un cierto porcentaje de su valor final, en respuesta a un cambio de paso de la entrada.

[23].

Capítulo 2

Diseño y construcción de un minisubmarino

En este capítulo se presenta la actualización de un minisubmarino explorador con un sistema de lastre, el cual se denomina como Minisubmarino 2. En base al minisubmarino 1 se analizó y se rediseñó parte de su estructura, aprovechando parte de la ya existente, pero, añadiendo sistemas que optimizarán el prototipo. Esto es lo que se quiere dar a entender como la actualización de un prototipo minisubmarino explorador. Este capítulo está organizado de la siguiente manera, en la primera sección se presentan las características del Minisubmarino 1 que se usó de base [8], así como las características del chasis, los motores que se usaron y el diseño de las propelas que se utilizaron. En la segunda sección se presenta el diseño y simulaciones que se realizaron, así como la caracterización del sistema de lastre, también, se presentan las características de los sensores que se implementan. Finalmente, en la tercera sección se presenta a manera de un análisis comparativo entre los minisubmarinos 1 y 2. Mostramos la comparación entre la estructura mecánica de ambos prototipos, las características más relevantes entre ambos minisubmarinos y el sistema de comunicación con el minisubmarino para ambos prototipos.

2.1. Minisubmarino 1

En este apartado se describe el Minisubmarino 1 que se desarrolló con anterioridad, su ensamblaje y diseño de propelas (ver referencia [8]). Se debe mencionar a manera de antecedentes acerca de la construcción del Minisubmarino 1 que se trataron varios desafíos. Uno de los retos más grandes a los que se tuvo que enfrentar el diseño de este prototipo fue la comunicación inalámbrica, descubriendo que la dispersión y la atenuación de la señal electromagnética en el medio acuoso (agua) solo se transmitía a una profundidad de medio metro, pero además, la cantidad de datos a través de esta señal era muy limitada, por lo que al investigar en la literatura, se encuentra que este desafío es abordado con un sistema de boyas lo cual es muy caro. También se enfrentó el problema de sellar filtraciones hacia los compartimientos, en un principio era una T de pvc de 6 pulgadas, al sumergir a profundidades del orden de 4 o 5 metros hay filtraciones, por lo que se cambió a los compartimientos de acrílico y una tapa con rosca, aun así, persistían filtraciones, menores, pero podían dañar el sistema electrónico, para esto se acudió a un químico y se recomendó una acetona o sellador con coeficiente de absorción alto y esto hizo que se sellaran totalmente los compartimientos de acrílico.

2.1.1. Chasis

Se utilizan dos tubos con un tapón para registro, el cual facilita abrir y cerrar de manera más sencilla, y así poder manipular el material interno. Estos tubos se diseñaron con el fin de contener la parte electrónica y ayudar a que el prototipo pueda emerger sin necesidad de usar los motores. Contiene dos placas laterales de acrílico, usadas para fijar las bases, en los extremos de los cilindros se colocaron tapones de registro de 4 pulgadas. Estos tubos se diseñaron con el fin de contener la parte electrónica [16].

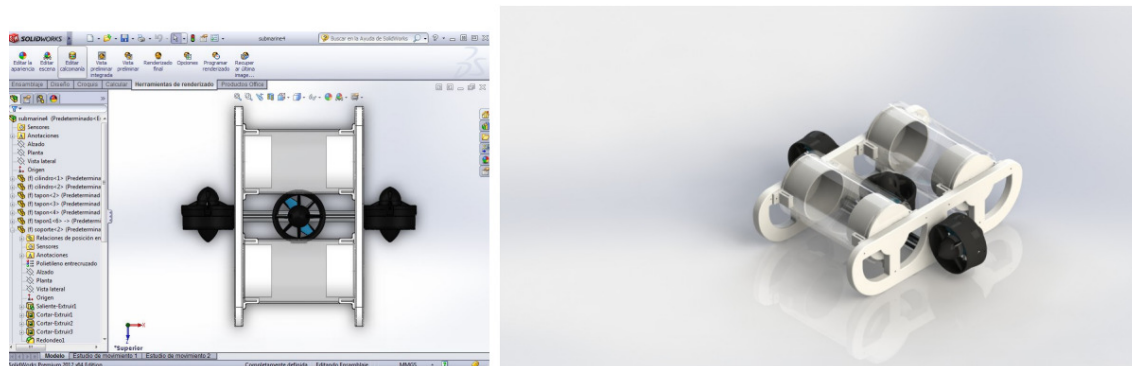


Figura 2.1: Diseño de minisubmarino

Finalmente para sostener las placas en conjunto con los cilindros, fueron utilizadas dos varillas de aluminio, las cuales se perforaron para elaborar rosca dentro de ellas y así poder usar tornillos para fijar en las placas laterales.

2.1.2. Propelas

Las propelas, son un elemento formado por una serie de dispositivos que se denominan aspas o álabes, dispuestos de forma concéntrica sobre un eje y que giran alrededor de éste en un mismo plano. Gracias a sus aspas pueden transmitir su energía cinética, creada al girar los álabes, a un fluido líquido o gas de manera que se crea una fuerza de tracción o empuje a lo largo del eje de rotación [16].



Figura 2.2: Propela de minisubmarino. Diseño original

2.1.3. Ensamble mecánico

En esta sección se muestra como se desarrollo el armado del prototipo, una ves terminado el diseño en SolidWorks. El material de construcción del casco del prototipo, en forma de cilindro, es de acrílico de 3mm de espesor, con tapones de 4" de PVC con aluminio, se utilizan dos placas laterales de acrílico para el soporte de los cilindros que transportan la parte electrónica, ademas de una base para sujetar las propelas al prototipo, el cual se construyo con impresión 3D con PLA. En la Figura 2.3 se presenta el diseño de la parte externa del submarino donde se incluyen todas las piezas descritas anteriormente, añadiendo los motores y dos varillas de aluminio para aumentar resistencia en su estructura. Como se mencionó en el diseño, posee dos motores para el sistema de avance y giro y un motor adicional para el sistema de inmersión. Cada motor cuenta con propelas de PLA que mejoran la propulsión del vehículo [16].



Figura 2.3: Construcción parte externa

2.1.4. Ensamble electrónico

El motor brushless o motor “sin escobillas” utilizado es un motor síncrono trifásico compuesto por una parte móvil donde están situados los imanes permanentes que es el rotor y una parte fija llamada estator para los motores brushless del tipo inrunner o el estator y rotor respectivamente para los del tipo outrunner. Los bobinados de un motor brushless están distribuidos a lo largo del estator en múltiples fases con una separación de 120° entre ellas. Las corrientes y los voltajes aplicados a cada uno de los embobinados del motor deben ser controlados independientemente mediante una conmutación electrónica. El dispositivo encargado de realizar esta tarea se denomina controlador de velocidad electrónico o mejor conocido como ESC.

La caracterización de los motores, como se muestra en la tabla 2.1, los cuales son brushless del tipo out runner.

RPM/V	750kV	Potencia máxima	250 W
Voltaje Máximo	15 V	Resistencia	0
Corriente Máxima	18 A	Masa	87 g

Tabla 2.1: Especificaciones de motores Brushless

En la tabla 2.2 se muestran las especificaciones del ESC (por sus siglas en inglés, Electronic Speed Controller) utilizado, el cual, es programable y funciona mediante PWM [16].

Corriente constante	30 A	Corriente máxima 40 A
Voltaje Máximo	15 V	■ Configuraciones programables
		■ Tipo de batería aceleración
		■ Rotación
		■ Modo de operación
Tipo de Motor	Sensorless brushless	
Masa	53 kg	

Tabla 2.2: Características de motores Brushless

Una de las condiciones para que el ESC se inicialice es enviar de la tarjeta arduino al ESC una señal cuadrada con 5V de amplitud y un periodo, T , de 20ms. Debido a que el ESC funciona con PWM, T debe ser constante mientras que la duración del pulso en alto (5V, ON) y en bajo (0V, OFF) pueden variar su valor. La segunda consideración para inicializar el ESC consiste en que la duración del pulso en alto, puede tomar valores entre 1100 μ s y 1900 μ s. Si T o el valor del pulso en alto tiene un valor diferente a los mencionados, el ESC no se inicializará. Una vez inicializado el ESC, los motores son puestos en marcha a partir del incremento o decremento del ancho del pulso en alto. Para inicializar el ESC se utilizó un ancho de pulso en alto de 1500 μ s. En el rango de 1100-1500 μ s el motor gira en reversa (o atrás) mientras que en el rango de 1500-1900 μ s el motor gire hacia adelante [16].

La base consta de un péndulo, ver Fig. 2.4, el cual tiene en un extremo incrustado el motor, y en el otro extremo sujeto a una balanza, ya que al ejercer un empuje el motor, jalará la balanza a un cierto punto.



Figura 2.4: Base Pendular [16]

De los resultados obtenidos se realizaron las gráficas Ancho de pulso (μ s) - Carga (N), Fig. 2.5, y Corriente (A)- Carga (N), Fig. 2.6, en las cuales se puede observar que a mayor corriente,

mayor carga y viceversa.

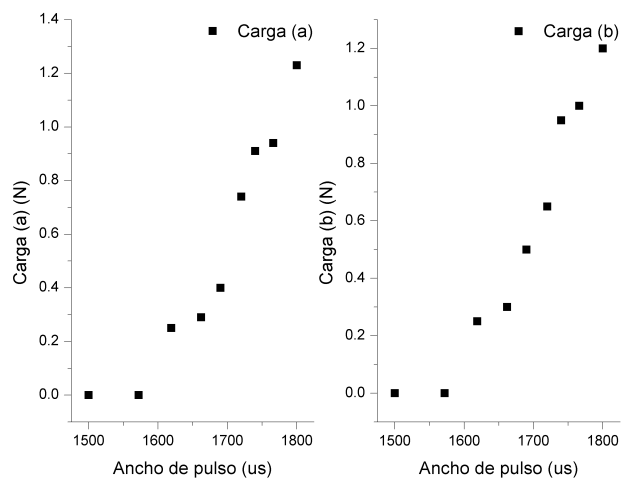


Figura 2.5: Resultados obtenidos de los motores con su propela

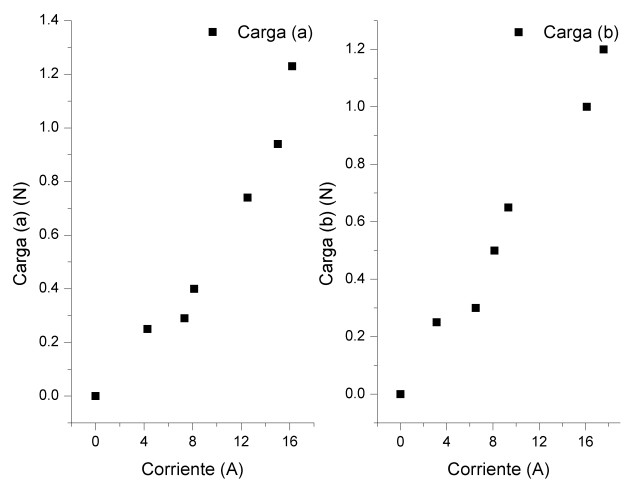


Figura 2.6: Resultados obtenidos de los motores con su propela

En las gráficas de ancho de pulso se puede ver que al incrementar el pulso, el cual influye en el aumento de velocidad del motor, genera una mayor demanda de corriente.

2.2. Minisubmarino 2

En esta sección se muestra el desarrollo y diseño que se realizaron en la reestructura del prototipo de minisubmarino 1. Primero se mostrará como fue modificado el chasis de 3 motores a una estruc-

tura con 2 motores, añadiendo el sistema de lastre, posteriormente se especifica el proceso de la adaptación de los sensores que se utilizan ya que es uno de los puntos que se quería mejorar del modelo anterior, de esta manera podremos obtener datos mas exactos con respecto a su entorno. El minisubmarino 1 contaba con 3 motores, como se ha mencionado, lo cual requería un consumo de energía mayor, usaba el prototipo 3 baterías de litio, pero además el motor que contribuía a la inmersión y emersión interfería fuertemente con los sensores, de ahí que fundamentalmente dos fueron las modificaciones principales, el ahorro de energía y hacer que los sensores midieran de manera optima las propiedades del medio, por lo que el nuevo diseño se penso en quitar el tercer motor y sustituirlo por un sistema de lastre que no interfiriera con las mediciones de los sensores.

2.2.1. Chasis

Se conservan los dos tubos para poder resguardar la parte electrónica, pero se elimino un motor re-ubicándolos como se muestra en la fig. 2.7. Dos se colocan de manera horizontal para realizar el movimiento en XZ, de esta manera el esfuerzo en su movimiento disminuye, activando ambos motores el movimiento se realiza en el eje X, sin embargo, al activar solo uno se puede redirigir la dirección usando el eje compuesto XZ. De los dos contenedores que se habían conservado del modelo anterior, se adapto uno para poder usarlo como base del sistemas de lastre, reubicando toda la parte electrónica en uno de los contenedores.

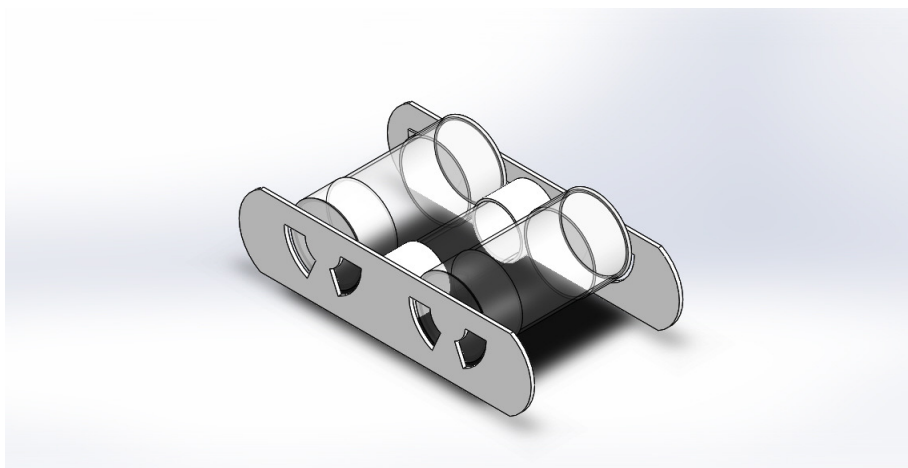


Figura 2.7: Submarino en SolidWorks

2.2.2. Ensamble electrónico

El motor utilizado en este proyecto fue el mismo que en el minisubmarino 1, aprovechando el material con el que ya se contaba, durante el proceso de diagnóstico se llevó a cabo una verificación de la caracterización, este proceso se llevó a cabo con la ayuda de un dinamómetro y un péndulo invertido, con el cual se pudo observar que los datos concordaban con los obtenidos con anterioridad. Permitiendo la reutilización de estos motores en el minisubmarino 2.

Para poder hacer el montaje en físico se realizó el rediseño de los soportes para la hélice, Fig. 2.9, ya que el material se había dañado por el tiempo que había tenido sin uso, además, se hizo más grueso para poder aguantar mejor la carga. Otra parte a la que también fue necesario hacer un rediseño fue la base del motor, ya que no estaba correctamente asegurado, lo que provocaba que tuviera un movimiento extra, generando pequeños círculos al momento de encenderlo, por lo



Figura 2.8: Motor armado

que se imprimió una nueva.



Figura 2.9: Soporte de hélice

2.2.3. Sensores

El crecimiento de la población y las industrias a nivel mundial ha traído consigo múltiples complicaciones. Una de las más significativas es el agotamiento de los recursos no renovables en el planeta, los cuales tienden a ser insuficientes para abastecer la demanda existente y la de generaciones futuras. Como respuesta alternativa los científicos han concentrado sus esfuerzos en generar energía eléctrica a partir del potencial energético de los océanos y en la predicción de cambios climáticos en el mundo. En consecuencia, la medición de variables como salinidad, temperatura y corrientes marinas, se han convertido en una necesidad esencial para el cumplimiento de estos objetivos, puesto que estas variables influyen de forma directa en los cambios climáticos y en el potencial de generación de energía oceánica. Las mediciones de estas variables no es tarea fácil, debido a las condiciones adversas que se encuentran en las profundidades (presiones altas, niveles de corrosión y conductividad eléctrica) y en la superficie marina (el poder destructivo de las olas) que dificultan la instalación de sistemas de mediciones eficientes y económicamente viables.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se realizó un rastreo de información en artículos de autores reconocidos en el tema y de páginas WEB de fabricantes con altos estándares

de calidad y el resultado de esta búsqueda se presenta a continuación.

Sensor de temperatura

Es un sensor de temperatura digital resistente al agua, que está hecho de acero inoxidable duradero. Cuenta con un amplio rango de medición y alta precisión, adecuado para diferentes ocasiones [24].



Figura 2.10: Sensor Digital De Temperatura Ds18b20 Resistente Al Agua

Características:

- Color: principalmente negro.
- Material: acero inoxidable.
- Longitud del cable: 1M.
- Tamaño del tubo: aprox. 6 x 50 mm (diámetro* longitud).
- Chip DS18B20 con 3 temperaturas Sensor.
- Resolución ajustable 9-12.
- Rango de voltaje de alimentación: 3.0V-5.5V.
- Salida: rojo (VCC), amarillo (DATA), negro (GND).
- Rango de temperatura de funcionamiento : -55 - +125 °C (-67 - +257°F).
- Temperatura de almacenamiento : -55 - +125 °C (-67 - 257 °F).
- Precisión en el rango de -10 a +125 °C +85 °C: $\pm 0,5$ °C.

[24]

Sensor de ph

El módulo PH-4502C Sensor de PH es un dispositivo que permite medir el PH con ayuda de una sonda que es la que toma la lectura (electrodo E201) mediante el conector BCN. ¿Para qué sirve el PH-4502C Sensor de PH? El PH-4502C es útil si cuentas con un jardín hidropónico, acuario, laboratorio, o que realices algún proceso como fermentación de cerveza en donde requieras medir el PH [25].



Figura 2.11: Ph-4502c Sensor De Ph Liquido Con Electrodo E201-bnc

Características:

- Modulo: PH-4502C
- Voltaje de Alimentación: 5 V Corriente: 10mA
- Dimensiones: 42 X 32 X 20 mm
- Electrodo E201-BNC Tipo de sonda: Grado de laboratorio.
- Tiempo de Respuesta: 5 seg
- Rango de detección: 0 - 14.(acido /base)
- Rango de temperatura: 0 – 80°C
- Temperatura de trabajo: 10 - 50°C
- Humedad de trabajo: 95 RH sin condensación

[25]

Sensor MS5837

El sensor de presión ultra pequeño MS5837-30BA de E Connectivity (TE) Measurement Specialties viene en un paquete de cerámica y metal de 3,3 mm x 3,3 mm x 2,75 mm. Este dispositivo cuenta con una interfaz de bus I2C para sistemas de medición de profundidad con una resolución de profundidad de agua de 2 mm. Este módulo relleno de gel incluye un sensor de presión de alta

linealidad y un convertidor ADC de analógico a digital de 24 bits de potencia ultra baja con coeficientes internos calibrados de fábrica. Este sensor proporciona un valor digital preciso de presión y temperatura de 24 bits, así como varios modos de operación que permiten al usuario optimizar la velocidad de conversión y el consumo de corriente. El sensor de presión MS5837-30BA de TE se puede conectar a prácticamente cualquier microcontrolador y no requiere programar ningún registro interno.



Figura 2.12: Sensor ms5837

Características:

- Paquete de cerámica y metal de 3,3 mm x 3,3 mm x 2,75 mm
- Módulo de alta resolución de 0,2 mbar
- Conversión rápida hasta 0,5 ms
- 0,6 μA de bajo consumo (en espera $<0,1 \mu\text{A}$ a $+25^\circ\text{C}$)
- Sensor de presión digital integrado (convertidor de analógico a digital de 24 bits $\Delta \Sigma$)
- Tensión de alimentación de 1,5 V a 3,6 V
- 0 bar a 30 bar, -20°C a $+85^\circ\text{C}$ rango de operación
- interfaz I2C
- Sin componentes externos (oscilador interno)
- Estabilidad a largo plazo
- Sellable herméticamente para dispositivos al aire libre
- Sellado diseñado para juntas tóricas de 1,8 mm x 0,8 mm

A continuación se hace la comparación de los modelos que se han cambiado del modelo Minisubmarino 1, al Minisubmarino 2, en donde no solo se agregaron el sensor de pH sino que se buscó que el sensor de temperatura fuera de mejor calidad en la sensibilidad. Con lo cual las mediciones serían más veloces y con una mayor precisión, ya que el porcentaje de error que se tiene de estos es menor al 5 %. En el caso de la temperatura el rango de error que maneja el sensor del Minisubmarino 2 es de 1 grado.

	Minisubmarino 1	Minisubmarino 2
Temperatura	MS5837-30BA	Ds18b20
pH		E201-BNC
Presión	MS5837	MS5837

Tabla 2.3: Comparación de sensores

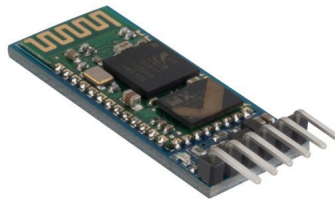


Figura 2.13: Módulo Bluetooth

Electrónica Bluetooth

Se utilizo un dispositivo hc-06, Fig2.13
El cual cuenta con las siguientes características:

- Modo Master o Slave
- No necesita antena externa
- Distancia de operación hasta 10 m
- Transmisión 4dBm
- Alimentación: 3,6 a 5 Vcc
- Tamaño compacto 44.73 x 17 x 7.4mm

Con el cual se envían pulsos PWM para poder controlar bombas de agua y motores brushless. Además, se usan para recibir la información recopilada por los sensores antes mencionados. Se determino el uso de este módulo ya que puede recibir y enviar información a una gran distancia, ya que la boya contiene un cable de 5m de largo con lo que puede ampliar el área de muestreo.

2.2.4. Sistema de lastre

El diseño que se realizó fue tras tomar en cuenta el análisis de fluidos que interactúan dentro del prototipo que se propuso. Se calculó la cantidad de aire y agua que podía ingresar en el diseño propuesto. Al iniciar el análisis se había hecho la propuesta de inyectar el aire por una válvula para expulsar el agua que se encuentra dentro para crear una burbuja de aire controlada que le permita subir y bajar según se requiera con la ayuda de un tanque de aire a presión.

La presión que ejerce el agua en Puebla por la altitud es de 99600 Pa por lo que como punto de inicio se necesito calcular la fuerza que se adecuada para poder usar el sistema

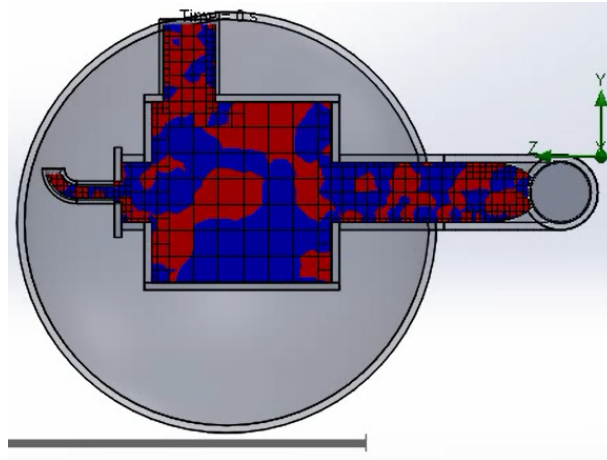


Figura 2.14: Análisis de fluidos propuesta No.1 de sistema de lastre

como un apoyo de ascenso y descenso del minisubmarino, la fuerza de presión que se calculó que es necesaria es de 101325 Pa. Fuerza que se buscó lograr con el diseño que se muestra en la Fig 2.15.

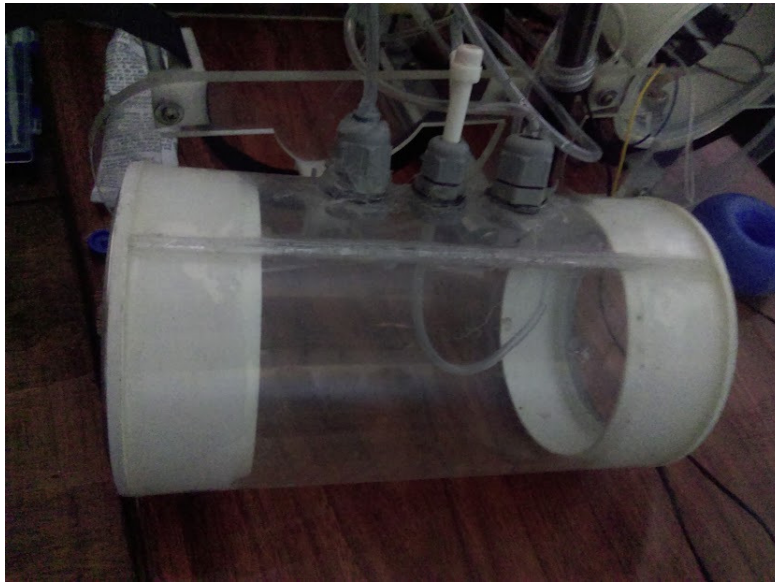


Figura 2.15: Tanque de lastre propuesto

El diseño que se realizó para el sistema de lastre fue con una idea de vacío mediante una bomba que mete y saca el agua del dispositivo, este se modeló en el programa SolidWorks para poder llevar a cabo el análisis de fuerzas correspondiente a la propuesta que quedaría en el prototipo final, Fig 2.16, por otro lado también se realizó un análisis de fuerzas externas, para poder saber como se comportaría a una profundidad requerida, con lo que se observa la presión a la que sería sometido, Fig 2.17, donde las zonas rojas nos muestran las partes más afectadas, es decir, donde se concentra más la presión.

Al final se llegó a la conclusión que serían necesarias 2 bombas.

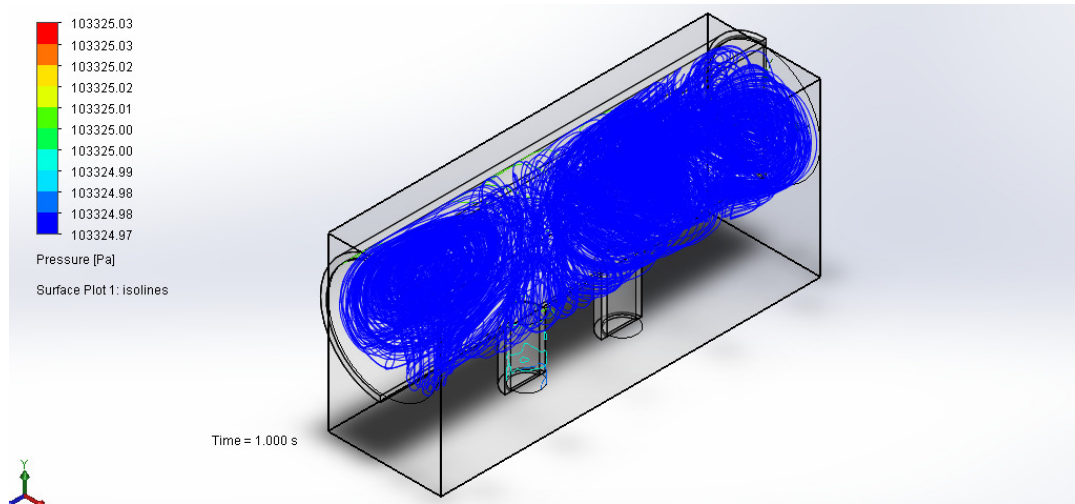


Figura 2.16: Análisis de fluidos sistema de lastre, segunda propuesta, presión hidrostática interna

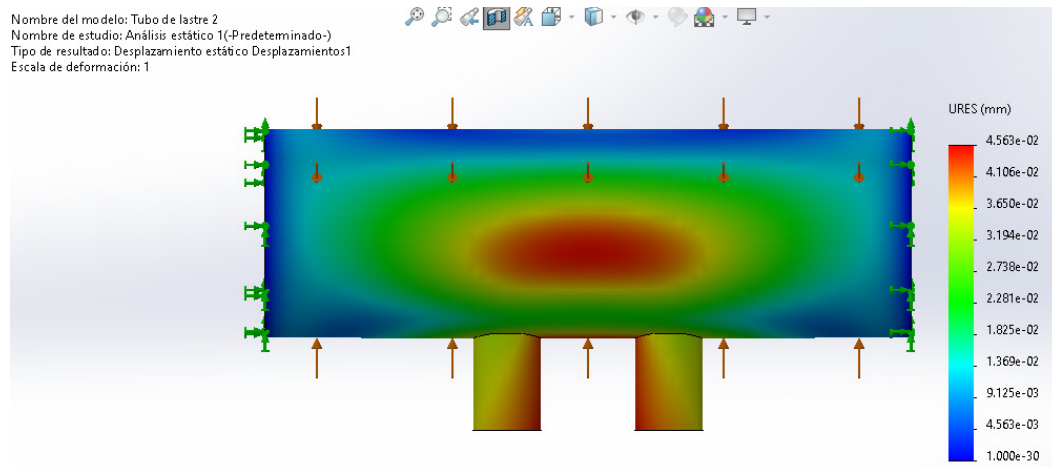


Figura 2.17: Análisis de presión externa sistema de lastre, Puntos de presión más afectados

Las características de las bombas, que se utilizaron se muestran a continuación:

- Voltaje de entrada: 2,5 a 6 Vcc
- Corriente: 130 a 220 mA
- Flujo: 80 a 120 l/h
- Consumo: 0,4 a 1,5 W
- Altura máxima de bombeo: 1 m
- Tubo conector: OD: 7,5 mm / ID: 4,85 mm
- Entrada de agua: Diámetro de 5 mm

Con estas bombas se ingresa y se expulsa el agua del sistema de lastre.

Con esta inclusión se aligera el diseño que se tenía, por lo que los motores que se tenían pensados para apoyar el descenso y ascenso del mismo ya no serían necesarios. Gracias a la introducción de agua en este dispositivo se puede controlar la densidad media del mismo, con lo cual se puede hacer que descienda o ascienda según se requiera. Al estar vacío la densidad del agua es mayor, por lo que el modelo se queda en la superficie, pero gracias a la ayuda de las bombas antes mencionadas se puede cambiar su densidad media, se equilibra la cantidad de agua en su interior con el aire que mantiene y así llevar el modelo a un punto requerido debajo del agua.

Esto también es gracias a que la densidad de los materiales es baja, pues su densidad volumétrica es de 1.19, ligeramente más pesado que el agua. Su densidad equivale a la mitad de la del vidrio, y un 43 % la densidad del aluminio. Se consigue así la propiedad de flotabilidad. En la Fig. 2.18 se puede observar la caracterización del sistema de lastre que se tuvo que realizar, donde se compara la cantidad de agua que puede tener con el tiempo que se tarda en llegar a su límite de capacidad, la cual es de 1900.663555 cm^3 .

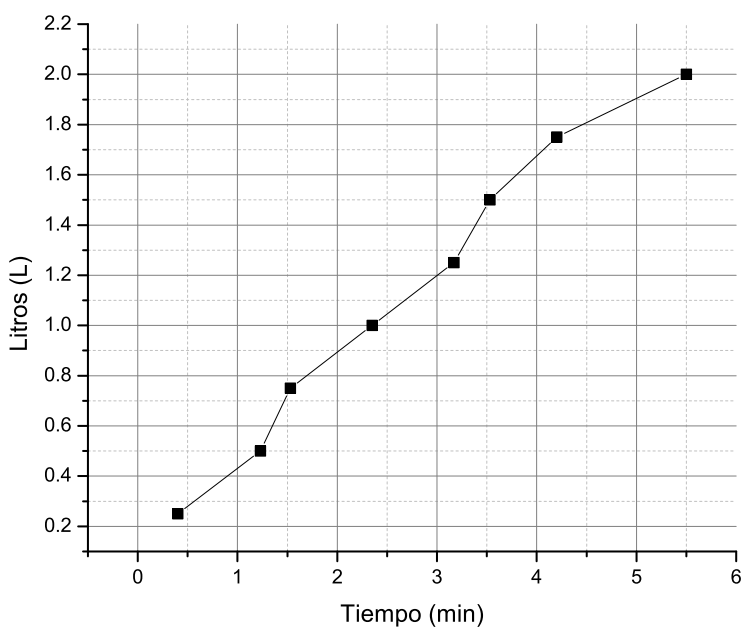


Figura 2.18: Caracterización de sistema de lastre (Litros - Tiempo)

2.3. Análisis comparativo entre Minisubmarino 1 y 2

Durante el proceso de buscar una actualización al prototipo de Minisubmarino 1 (Fig. 2.19 (a)), fue necesario el rearmar el prototipo, para así poder analizar los puntos débiles que se llegaron a presentar o que se pudieran mejorar. Uno de estos es la parte de la alimentación, ya que el minisubmarino 1 contenía 3 baterías para poder alimentar todo su sistema, en el prototipo 2 se pudo reducir la cantidad de baterías, ya que requería menor cantidad para su funcionamiento. Una consecuencia de la implementación de un sistema de lastre es el número de motores que se

utilizaron, puesto que en el prototipo 1 se había planteado el uso de 4, al final se utilizaron 3, siendo este aún un número elevado. Algo que, en el Minisubmarino 2 (Fig. 2.19 (b)) se redujo, pues se implementó un sistema pasivo. En donde uno de los compartimientos que se utilizaban para el equipo electrónico, se modificó para poder usarlo como sistema de lastre.

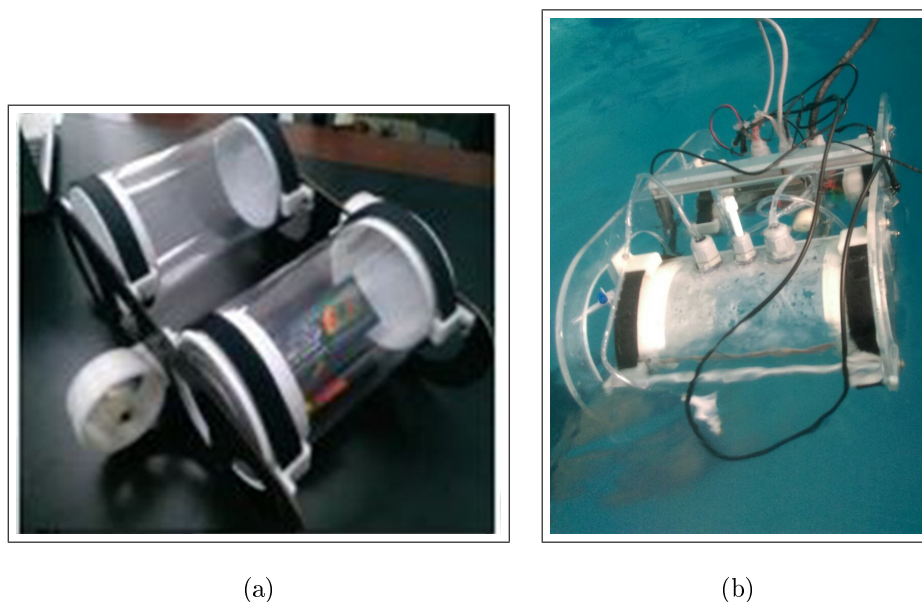


Figura 2.19: (a) Minisubmarino 1 armado, (b) Minisubmarino 2 armado

Otro cambio que se pudo llevar a cabo fue la manera de comunicación, pues en el Minisubmarino 1 (Fig. 2.20 (a)) se pudo observar que era uno de los puntos que más se dificultaron, teniendo que integrar un sistema de captura de datos que debía ser activado antes de ingresar en el ambiente, siendo apagado hasta el momento en que se retiraba, esto debido a que el dispositivo almacenaba los datos en una memoria SD. Una vez fuera esta se retiraba y podía conectar en una computadora para poder analizar, sin embargo, en el Minisubmarino 1 (Fig. 2.20 (b)) prototipo 2 se hizo una actualización ya que se pudo agregar un switch para encender y apagar la toma de muestras, permitiendo la captura de datos en puntos específicos, además de que se implementó la comunicación bluetooth mediante un sistema con boya.

Finalmente se puede observar los cambios generales que se realizaron en el proceso de actualización que se llevó a cabo (ver Tabla 2.4), en donde se vació la información antes mencionada sobre el cambio en la energía requerida, por lo que el número de baterías se redujo considerablemente, ya que el número de componentes que se requirieron disminuyó de tres baterías a una batería, otro de los cambios más importantes fue el sistema de inmersión/emersión, ya que de ser uno activo, se modificó para llegar a uno pasivo, permitiendo que el ambiente a estudiar se mantuviera sin grandes perturbaciones, finalmente, se puede observar que en la comunicación se cambió de un sistema de TETHER o cordón umbilical, en donde la comunicación es mediante un cable con el Minisubmarino, se realizó la transición a uno mediante sistema de boya, con lo cual el área a analizar aumenta considerablemente.

Diseño y construcción de un minisubmarino
2.3 Análisis comparativo entre Minisubmarino 1 y 2

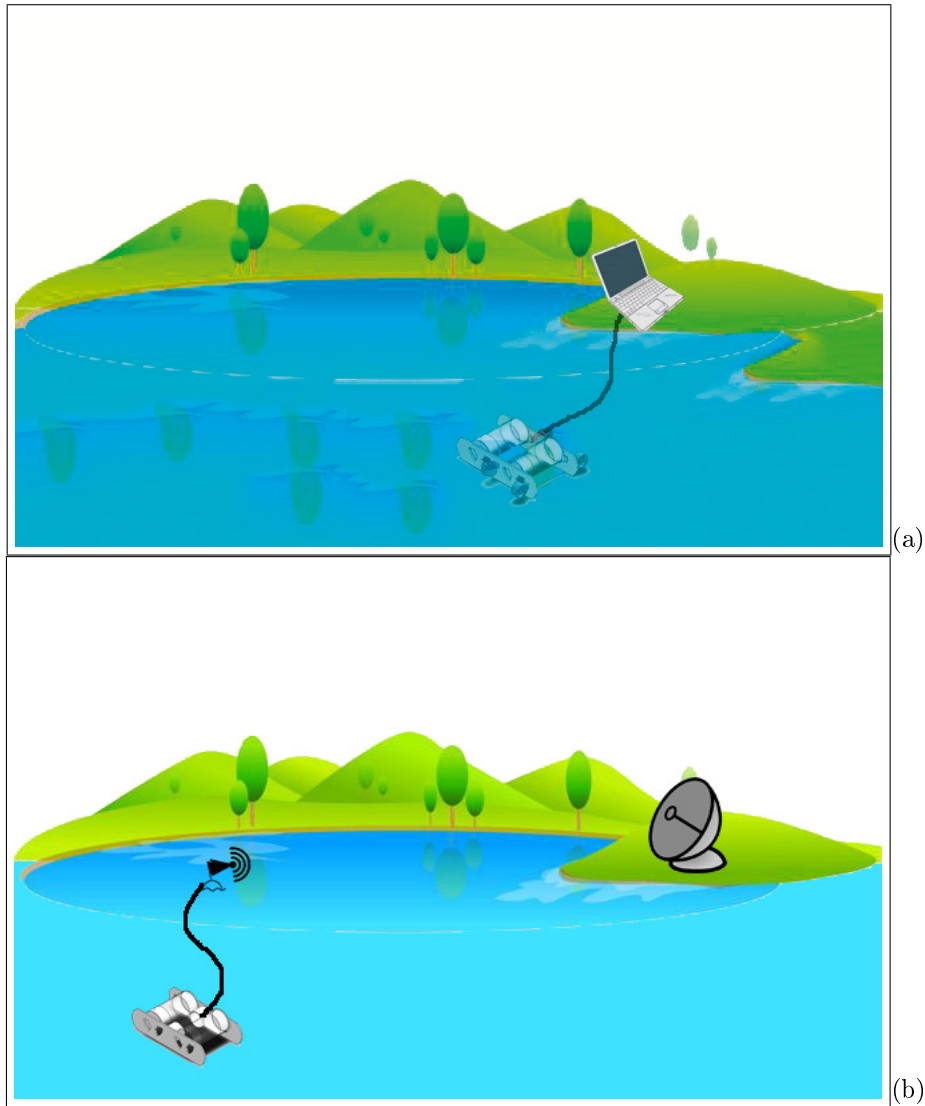


Figura 2.20: (a) Diagrama de comunicación Minisubmarino 1, (b) Diagrama de comunicación Minisubmarino 2 armado

	Minisubmarino 1	Minisubmarino 2 (Actualización)
Fuente de alimentación	3 Pilas (14.8 V c/u)	1 Pila (14.8 V c/u)
Sistema de inmersión/emersión	Activo (1 motor)	Pasivo (Lastre)
Comunicación	TETHET (Cordon umbilical)	Bluetooth
Sensores	Temperatura, presión	Presión, temperatura, pH

Tabla 2.4: Comparación de minisubmarinos

Capítulo 3

Resultados de exploración

En este capítulo se presentan los diferentes resultados de la exploración, tanto de navegación, como de la adquisición de datos de las cantidades físicas del ambiente acuífero. Estas pruebas se realizaron en una alberca ubicada en el municipio de San Nicolas de los Ranchos, Puebla, teniendo una profundidad de 3 metros y unas dimensiones de 10 metros de largo por 4 de ancho, este lugar fue elegido debido a que las pruebas de tomas de datos se realizaron durante la pandemia de Covid 19, donde podremos observar los cambios que se realizaron, como la instalación de un sistema de lastre, en la primera sección se reportan los resultados de las pruebas de inmersión. En la segunda sección se presentan los resultados obtenidos con los sensores, indicando los tiempos de termalización de cada uno de los sensores empleados, así como los resultados de las tomas que se realizaron con el prototipo en funcionamiento. Finalmente se hace una comparación con los datos obtenidos del modelo anterior, comprobando de esta manera si se lograron los objetivos planteados.

3.1. Pruebas de inmersión

En este apartado se menciona que los resultados de inmersión son similares para el Minisubmarino 2 con los del Minisubmarino 1, ya que la forma de sellado fue la misma, se usó una acetona de baja densidad que impedía el ingreso del agua por las tapas metálicas con un sello de goma para crear presión.

3.2. Pruebas con los sensores

Usando el programa LabView se pudo hacer un switch para activar y desactivar la toma de datos de los sensores. De esta forma el muestreo se ha podido limitar a ciertas zonas específicas.

El muestreo es un proceso o conjunto de métodos para obtener una muestra finita de una población finita o infinita, con el fin de estimar valores de parámetros o corroborar hipótesis sobre la forma de una distribución de probabilidades o sobre el valor de un parámetro de una o más poblaciones. De este muestreo que se obtuvieron una gran cantidad de datos, los cuales se clasificaron de acuerdo al periodo en que fueron tomados dependiendo de la posición. Para poder ser más preciso en los datos que se van a comparar, se realizó un promedio estadístico de 20 datos del muestreo realizado.

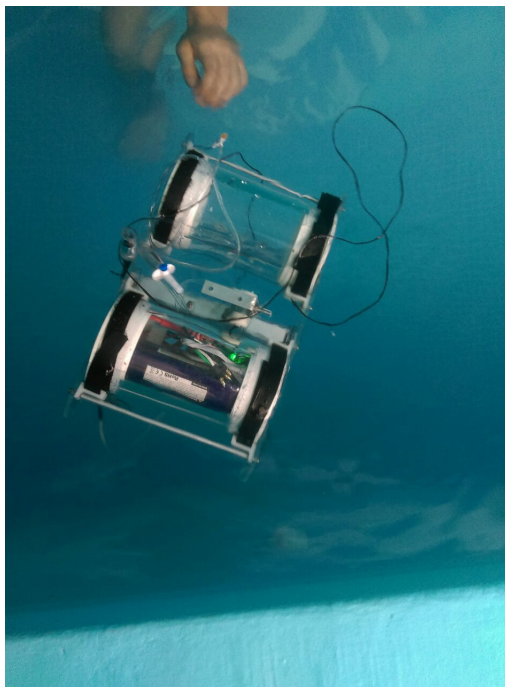


Figura 3.1: Estabilidad de prototipo minisubmarino

3.2.1. Termalización de Sensores

Antes de pasar a comparar los resultados se debe tener en cuenta que para poder confiar en los datos recopilados primero se obtienen datos para saber a partir de que punto en el tiempo y a que profundidad los sensores han estabilizado su toma de valores en el entorno. A este periodo de tiempo en el que el valor ya no cambia se le conoce como periodo de termalización. Así por ejemplo, en la figura 3.2(a) se puede observar que al inicio las mediciones del sensor de presión varían fuertemente hasta que en 0.8s el valor no cambia, ya que la medición no es instantánea.

Por lo que para este sensor el periodo de termalización es de 0.8s, por otro lado tenemos el sensor de Temperatura Ds18B20 con el que podemos observar que una vez activado el sensor, el muestreo no comienza inmediatamente, tiene un retraso de 0.1s, sin embargo tarda 1.2s para estabilizar su muestreo y comenzar a enviar datos confiables.

Finalmente, el sensor de Ph E201-BNC que también tiene un retraso de 0.1s tarda un lapso mayor en estabilizarse, teniendo este que transcurrir 1.6s. Al observar los tiempos de los demás sensores, podemos llegar a la conclusión que para que los valores sean confiables se debe esperar un tiempo de 1.6s para que todos los sensores hayan pasado por su periodo de termalización, ya que si se adquieren las mediciones antes, los datos no serían confiables. Es importante mencionar que el periodo de termalización se realizó a 0.3m de profundidad en el punto $C=(10,4,0)$ (Fig. 3.3 (b)).

3.2.2. Valores medios de sensores

Una vez que el prototipo Minisubmarino 2 se ha terminado de armar, habiéndose corroborado que no existen filtraciones y se ha revisado en que momento los datos obtenidos eran confiables se

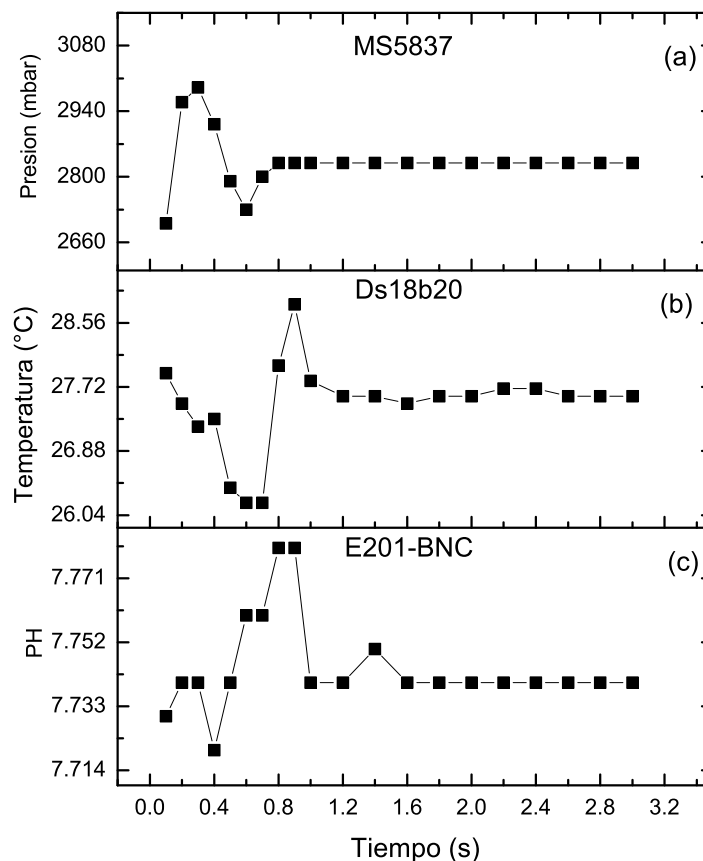


Figura 3.2: Termalización de Sensores a una profundidad de 0.3m en el punto C=(10,4,0) (Fig. 3.3) (b). En (a) se muestran las mediciones del presión, en (b) se muestran las mediciones de Temperatura, en (c) se muestran las mediciones de pH

procedio a realizar pruebas de capturas de datos siguiedo una ruta, de donde se pudieron obtener datos. Los resultados se encuentran a continuación (ver Fig. 3.3). En donde se observa que los puntos a A, B, C, D son el número de muestra 1, 2, 3, 4 respectivamente, puntos de captura de datos que se encuentran a 0.3 metros de profundidad, mientras que en los puntos A', B', C', D' son las muestras 5, 6, 7, 8 respectivamente, puntos de captura que se encuentran a 3m de profundidad. Es importante mencionar que durante el recorrido y la captura de datos la alberca en donde se realizó el procedimiento estaba activa, bombeando agua consntantemente.

Se puede observar 3 variables, temperatura, ph y presión, ver Fig. 3.3, el comportamiento de las mediciones en los sensores del dispositivo tiende a ir en aumento, el cálculo que se hizo con respecto al comportamiento esperado fue en el caso de la presión con una pequeña diferencia, pues en el cálculo que se realizó la presión hidrostática esperada era de 3853.46 hPa a 0.3m de profundidad, sin embargo, al bajar 3m la presión hidrostática que se llega a ejercer es de 29318 hPa, algo que podemos ver en la gráfica de la figura (3.3 (d)) en donse se muestra que se acerca al valor esperado. Si bien el comportamiento de la temperatura se comparo con un termómetro de mercurio, el valor

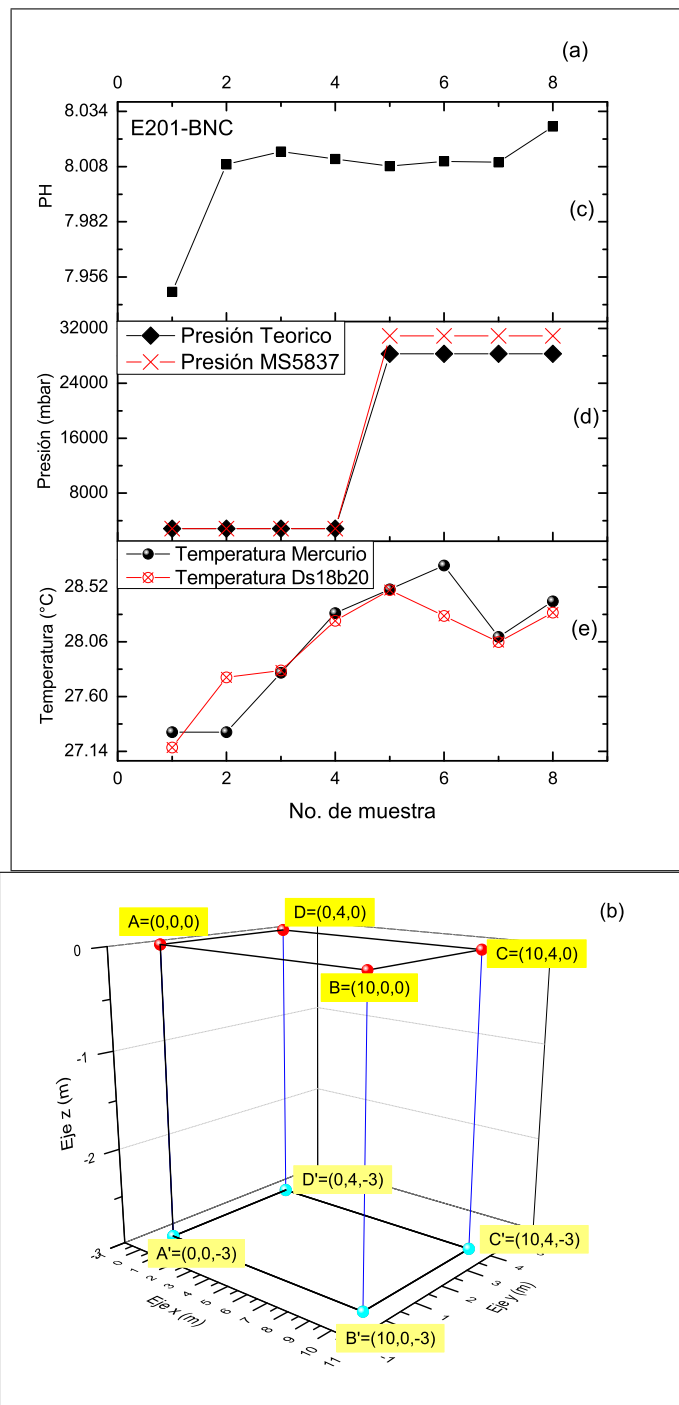


Figura 3.3: En (a) se muestran los valores medios de los sensores externos. En (c) se muestran las mediciones del presión, en (d) se muestran las mediciones de Temperatura, en (e) se muestran las mediciones de pH. En (b) se muestran las coordenadas en donde se hicieron las mediciones y la ruta de navegación que se realizó.

tampoco vario mucho en cuestión con el obtenido. Sin embargo, podemos ver que la corriente creada por el bombeo constante de agua causa que en los puntos 5 y 6 sean los puntos más calientes.

Sin embargo en el caso del Ph, algo que se puede concluir es que debido a la pequeña oleada que se causaba en algunos casos, la medición que se toma es de agua fría y en otras con agua más caliente debido al efecto de la convección de calor que tiene lugar dentro de la alberca, gracias al movimiento constante de las partículas.

Finalmente, se puede corroborar que el sistema de lastre logro el objetivo de mejorar en la toma de datos, pues tras haber hecho una comparación de las gráficas en donde se puede ver más claramente el comportamiento de estos, iniciando por la presión (Fig. 3.4), donde se pude observar que en el prototipo anterior las lecturas son muy aleatorias, sin embargo, en el segundo prototipo se pude ver como existe una lectura con mas cercanía a la realidad, pues no solo se esta comparando con el gráfico anterior, sino que también tiene una aproximación más cercana a la calculada.

Se debe considerar que en el prototipo anterior las tomas de datos fueron hechas mientras iba descendiendo, en comparación con el prototipo actual, en el cual se hicieron 8 tomas de datos, donde, las primeras 4 se hicieron a 0.3 m de profundidad y las siguientes 4 se realizaron a 3m de profundidad, para poder comparar las diferencias que podrían existir en estas dos zonas.

Como segunda comparación, se debe ver la temperatura (Fig. 3.5), en donde en a) se puede observar la relación que hubo con la temperatura y la profundidad, la temperatura llega a variar demasiado por el actuar de las propelas que llegan a calentar el agua a su alrededor, mientras que en el prototipo con sistema de lastre la temperatura se nota más acorde al sensor de mercurio que se utilizó para corroborar los datos y así poder validarlos.

Con lo anterior mostrado en las Fig. 3.4 y 3.5 se puede comprobar que el uso de un sistema de lastre permite diagnosticar de una forma mas precisa el ambiente deseado, pues el ruido no solo se eliminó considerablemente, sino que ahora podemos confiar en los datos obtenidos para crear una estrategia que pueda ayudar el entorno elegido.

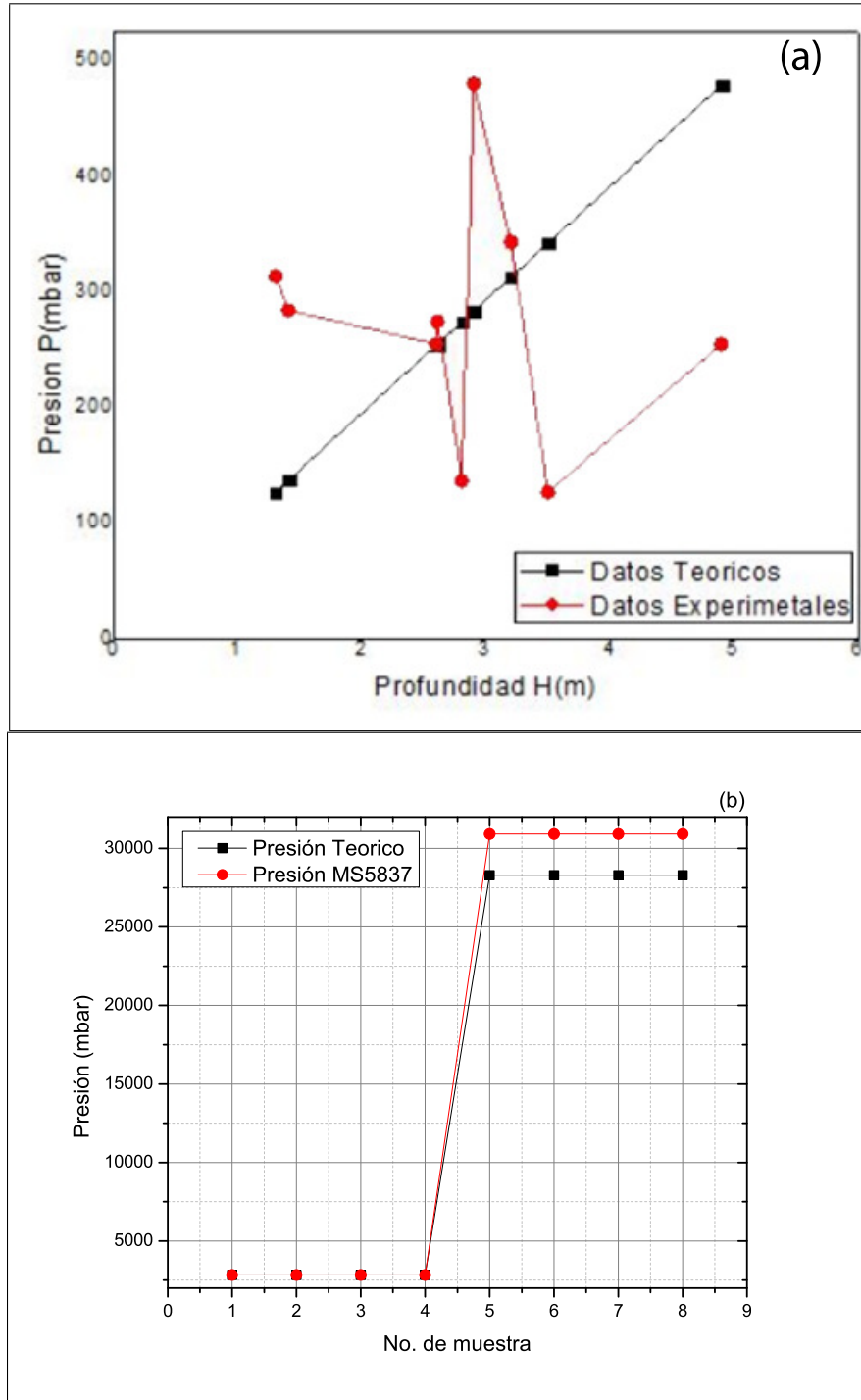


Figura 3.4: a) Datos obtenidos de presión-profundidad Minisubmarino 1 [16], b) Datos obtenidos de presión-número de muestras Minisubmarino 2

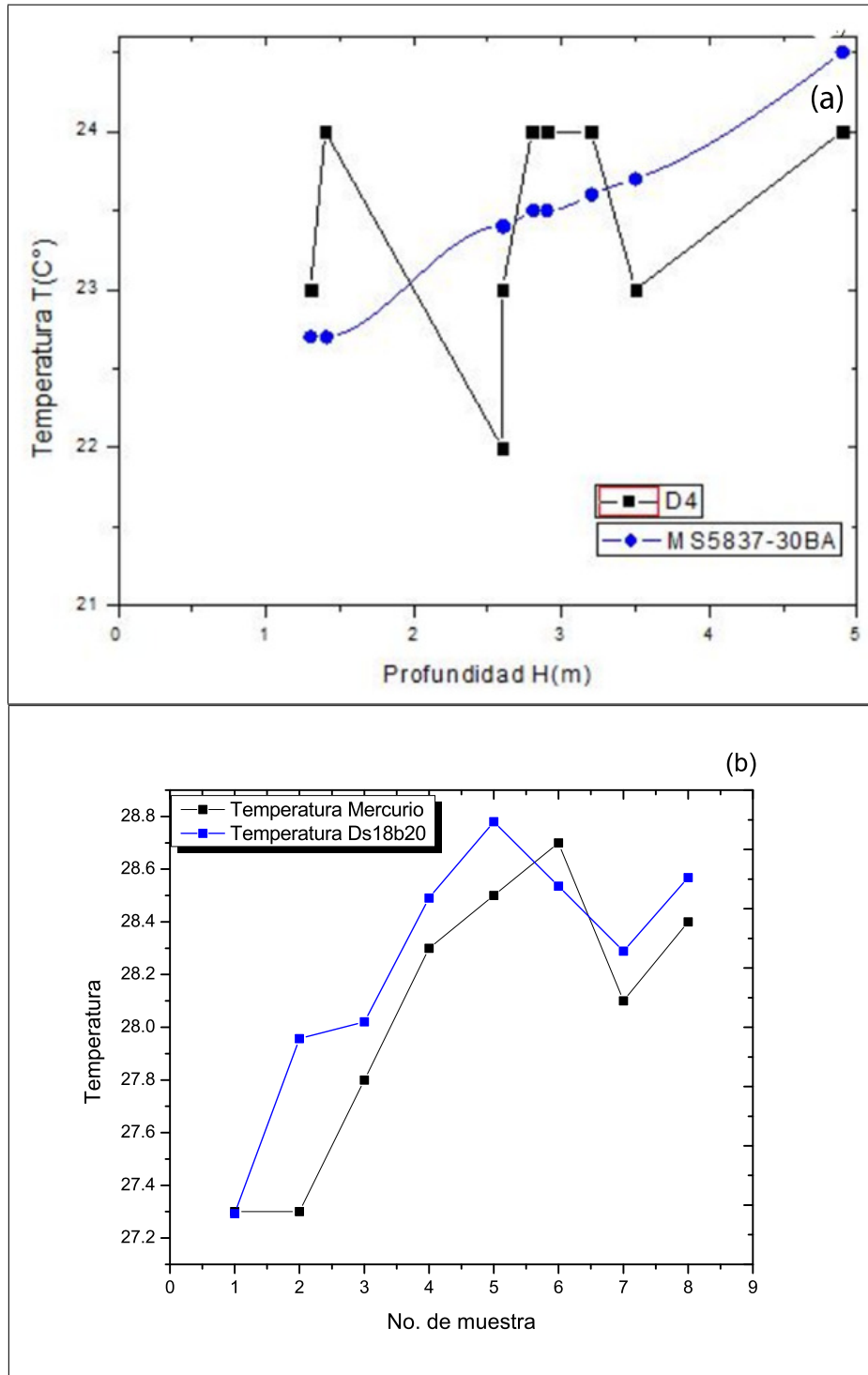


Figura 3.5: a) Datos obtenidos de temperatura-profundidad Minisubmarino 1 [16], b) Datos obtenidos de temperatura-número de muestras Minisubmarino 2

Capítulo 4

Conclusiones

Con respecto al diseño que se realizó se trató de aprovechar todo el material con el que se contaba del prototipo 1, si bien se pudo reutilizar gran parte del prototipo con el que ya se contaba gracias a pequeñas adaptaciones, son estos cambios los que logran darle mayor estabilidad en la toma de muestras. El uso de los programas de simulación SolidWorks y Comsol fueron de gran ayuda al momento de aproximar las modificaciones necesarias y el posible comportamiento que tendría.

Este cambio no solo ayuda con el descenso y ascenso del dispositivo de una manera más eficiente, sino que el ruido que se genera en el ambiente, en este caso el agua del entorno no se perturba al punto de poder alterar los datos obtenidos dándonos mediciones mejores con respecto a aquellas obtenidas por el prototipo 1. Este fue uno de los mayores retos a tratar, por lo que se habían estado buscando opciones, el dispositivo original, que se tomó como punto de partida fue un modelo antes trabajado, este modelo usaba una propela que ayudaba en su descenso, sin embargo, esto causaba una alteración en los datos recopilados, haciendo dudar de la veracidad de la información analizada. Problema que se trató como prioridad durante este trabajo, llegando a considerar más viable el método de un sistema de lastre.

El uso correcto de los sensores y el equipamiento adecuado también es un paso importante para poder tener éxito en nuestro objetivo, sumado a la correcta interpretación de los datos que vamos a analizar, por lo que es importante tener claros conceptos como termalización.

Como paso siguiente se tiene pensado un sistema de control para el movimiento horizontal del prototipo, ya que en este momento solo se ha usado un sistema de guía, además de que podemos ver que una de las limitaciones que tiene es que su uso es solo para ubicaciones con agua estática, es decir, que no tengan movimiento, pues el equipo y el diseño necesario para poder soportar corrientes de agua no se tiene por el momento.

Apéndice A

Constancia-LXIV-CNF



Figura A.1: Diseño sistema de lastre

Apéndice B

Primer Foro Regional Tlaxcala



Figura B.1: Diseño y construcción de un minisubmarino explorador de aguas no profundas.

Apéndice C

Congreso Nacional Mecatrónica 2022



Figura C.1: Congreso Nacional de Mecatrónica 2022

Bibliografía

- [1] Programa de Apoyo al Desarrollo Hidráulico de los Estados de Puebla, Oaxaca y Tlaxcala. (PADHPOT - Puebla). (s. f.). Recuperado 20 de enero de 2022, de [http : //www.agua.unam.mx/padhpot/puebla.html](http://www.agua.unam.mx/padhpot/puebla.html)
- [2] La cuenca Atoyac ha llegado a su límite ambiental: investigadores | Ibero. (s. f.). Recuperado 09 de marzo de 2022, de [https : //www.iberopuebla.mx/noticias – y – eventos/noticias/la – cuenca – atoyac – ha – llegado – su – limite – ambiental – investigadores](https://www.iberopuebla.mx/noticias-y-eventos/noticias/la-cuenca-atoyac-ha-llegado-su-limite-ambiental-investigadores)
- [3] Ruiz, L, Contaminación de Valsequillo es una barrera para la fauna, 2020, agosto 20, [https : //www.eluniversalpuebla.com.mx/entrevistas/contaminacion – de – valsequillo – es – una – barrera – para – la – fauna](https://www.eluniversalpuebla.com.mx/entrevistas/contaminacion-de-valsequillo-es-una-barrera-para-la-fauna)
- [4] Anon, (2016), disponible en: <http://www.ashteadtechnology.com/rentalequipment/ecahytecrowingbat/>.
- [5] Rovexchange and rovs, what are rovs, what is an rovs (2020) disponible en: <http://www.rovexchange.com>
- [6] Fossen, T. I (1991). *Nonlinear Modeling and Control of Underwater Vehicles*. PhD Thesis. Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.
- [7] Noaa Ocean Explorer, technology submersibles, <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/subs.html>.
- [8] Popoca Rodríguez, L. et al. (2017). *Diseño y construcción de un mini submarino explorador guiado a distancia*. B.S. thesis.
- [9] Antonelli, G. and Robots, U. (2006). *Motion and force control of vehiclemanipulator systems*. Underwater Robot, Springer-Verlag. (revisado en enero de 2022)
- [10] Remotely operated vehicle committee of the marine technology society, web Rov.org (Revisado en diciembre del 2021)
- [11] Nicholson, J. W., & Healey, A. J. (2008). *The present state of autonomous underwater vehicle (AUV) applications and technologies*. Marine Technology Society Journal, 42(1), 44-51.
- [12] *Noaa office of coast survey: Autonomous underwater vehicles (auv)* web. [https : //tinyurl.com/bdfrcvnd](https://tinyurl.com/bdfrcvnd), (revisado en enero de 2022)
- [13] Juarez, B. and Brazil, J. (2014). *SUPERFICIE FLOTANTE*. Kas. [https : //www.kas.de/documents/273477/273526/7_file_storage_file_175014.pdf/4f031ef8 – 4ca8 – 30d0 – 7e50 – 6cb95cc86148?version = 1,0&t = 1539651674475/](https://www.kas.de/documents/273477/273526/7_file_storage_file_175014.pdf/4f031ef8-4ca8-30d0-7e50-6cb95cc86148?version=1,0&t=1539651674475/).
- [14] Witting, James M. “A unified model for the evolution nonlinear water waves.” Journal of computational physics 56.2 (1984): 203-236.

- [15] Newman, J. N. *Marine hydrodynamics*. ed. MIT press, Cambridge, Massachussets London, England (2018)
- [16] Ortiz-Torres, G., Schacht-Rodriguez, R., Guerrero-Sánchez, M., Reyes-Reyes, J., and Garcia-Beltrán, C. *Desarrollo y construcción de una plataforma experimental de un uav para pruebas de control automático*, Congreso Nacional de Control Automático 2017 Monterrey, Nuevo León, México, Octubre 4-6, 2017
- [17] Navarro, M. A. M. (s. f.). Sistema propulsor (hÃ©lice). Recuperado 28 de enero de 2022, de <https://www.manualvuelo.es/3sifn/32helic.html>
- [18] ¿Sabes qué es la cavitación? (2022, 31 agosto). Web: <https://midebien.com/sabes-que-es-la-cavitacion/>
- [19] Water quality - lake scientist, disponible en: <http://www.lakescientist.com/lakefacts/water-quality/>. (revisado en diciembre de 2021)
- [20] De Balle de Dou, J. (2013, noviembre). *El sistema propulsivo del buque: Las hélices marinas y el fenómeno de la cavitación*. UPC. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099,1/20293/TFC.pdf>
- [21] Herrador, R. E. (2009). Guía de usuario de arduino.
- [22] Arduino - Home. (s. f.). Recuperado 28 de octubre de 2022, de <https://www.arduino.cc/>
- [23] Sensores: Qué Son, Cómo Funcionan, Características Y Tipos. (2022, 7 septiembre). SDI. <https://sdindustrial.com.mx/blog/sensores/>
- [24] alldatasheet.com. (s. f.-b). DS18B20 Datasheet, PDF - Alldatasheet. Recuperado 29 de agosto de 2022, de <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ds18b20+datasheet>
- [25] E201-BNC General Purpose pH Electrode - Bante Instruments. (s. f.). Recuperado 29 de agosto de 2022, de <http://www.bante-china.com/enproductsview/745.html>
- [26] alldatasheet.com. (s. f.). BMP280 Datasheet, PDF - Alldatasheet. Recuperado 29 de agosto de 2022, de <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Bmp280>.