



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI
SUBMARINO EXPLORADOR GUIADO A DISTANCIA

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

Licenciado en Electrónica

PRESENTA:

Liliana Popoca Rodríguez

ASESOR:

Dr. José Eladio Flores Mena

Puebla, Pue, 2017



Primero y muy importante, me gustaría agradecer a mis padres, por haberme apoyado hasta ahora para obtener una carrera universitaria y también por siempre animarme a cumplir todo lo que me proponga.

Al Dr. José Eladio Flores Mena por otorgarme su apoyo en la universidad desde mi ingreso, además de motivarme a realizar investigación y por su apoyo para realizar este trabajo de tesis.

A la BUAP al otorgarme una beca de tesis a través del Plan Anual 2015 del Cuerpo Académico Sistemas No Lineales: Modelado, Simulación e Implementación. Gracias al proyecto VIEP 2016 Estudio Teórico de una Flujo Pulsátil de una Solución Coloidal, del cual obtuvieron recursos para materiales utilizados en este trabajo de tesis.

A Yair Izanami González Hernández, gracias a su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Y por último, pero no menos importante, también agradezco a mis amigos y profesores ya que gracias a su apoyo y amistad aportaron a mis ganas de continuar estudiando y superarme.

Resumen

En este trabajo de tesis presentamos el estudio sobre diseño y construcción de un mini submarino explorador guiado a distancia, un mini submarino es un sistema electro-mecánico que es de gran interés científico y que tiene muchas aplicaciones tecnológicas, esto 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 fluido, y los cuales deben ser determinados experimentalmente. Y por otro lado, las aplicaciones tecnológicas de estos dispositivos son amplias tanto en el mar, lagos, lagunas y ríos. Una aplicación a futuro es la posibilidad de tratar los micro submarinos navegando en un sistema como la red del flujo sanguíneo. Una aplicación básica que nos motivó a desarrollar este tipo de sistemas es la exploración, lo cual significa proveer al mini submarino de sensores para que midan ciertas cantidades físicas que sean útiles en el diagnóstico del ambiente acuíferos. En este trabajo de tesis se diseñaron y construyeron dos mini submarinos, el primero con una configuración de dos motores y el segundo con una configuración de tres motores. En el primero cabe destacar el sellado mecánico del eje móvil que soportaba a los dos motores, no obstante, se tuvo que abandonar porque no se logró el sellado de la tapa superior debido a que la estructura del submarino es de Policloruro de Vinilo (PVC), que es un material deformable.

En el segundo prototipo se diseñó el chasis (compartimentos cilíndricos, patines de estabilidad y barra de soporte del tercer motor), propelas y toberas empleando el software comercial SOLIDWORKS. La construcción de estas partes se realizó por medio de una impresora 3D, con la que contamos. En los compartimentos cilíndricos del chasis, se colocó la parte electrónica por lo que el sellado de éstas fue de gran importancia; para el sellado de estos compartimientos, se realizó la unión de los cilindros de acrílico con los tapones de registro, los cuales contienen tapón de metal con rosca, para abrir y cerrar sin problema los compartimientos. Se realizaron las pruebas de inmersión a una profundidad de 5 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 para la adquisición de datos por los sensores, incluyendo la sintonización del funcionamiento de los motores y el módulo para la comunicación vía bluetooth, esta comunicación es para guiar el

movimiento del prototipo, usando un teléfono celular por medio de una aplicación conocida como (Electrónica Bluetooth). Los datos obtenidos por los sensores, fueron almacenados en una memoria externa acoplada a la tarjeta Arduino, la cual se incluyó en el interior del prototipo. Finalmente, en las pruebas de exploración se logró por medio de los sensores de temperatura y presión (MS5837-30BA) realizar tomas de datos, los cuales fueron obtenidos a diversas profundidades. Estos datos fueron validados por la comparación de una computadora para buceo modelo D4, (propiedad del Dr. Manuel Rendón Marín), ésta contiene sensores para medir profundidad y temperatura.

Introducción

La exploración ha sido fundamental para el desarrollo humano, y como se ha llevado a cabo por distintos fines, tales como incrementar el conocimiento geográfico de un área, la generación de rutas nuevas de transporte, creación de nuevas rutas turísticas, etc. Antiguamente la exploración era realizada mediante medios en los que se interactuaba directamente con el ambiente por lo que esto limitaba la capacidad de exploración ya que en ciertas ocasiones no era viable acceder a ciertas zonas y aunque el conocimiento generado en el pasado era basto, estaba lejos de ser suficiente [1].

En la actualidad enfrentamos diversos problemas de índole ecológica debido a la contaminación generada por la presencia humana y que ha ido creciendo de manera exponencial en el último siglo. Uno de los problemas más importantes a los que nos enfrentamos en la actualidad y que puede afectar la base y el desarrollo humano es la contaminación de aguas, ya que, aunque en la actualidad tiene diversos usos como la generación de energía, se ha perdido de vista el punto de fundamental de este recurso, su necesidad para la subsistencia humana [2].

Actualmente se poseen tecnologías que nos permiten expandir nuestras fronteras y acceder a lugares donde antes no se podía llegar, controlar dispositivos a distancia, el surgimiento de distintos sistemas para detectar cambios físicos, etc. Esto nos permitirá poder desarrollar tecnologías con la que podremos explorar depósitos de agua contaminados en sistemas como lagos o lagunas, mediante la aplicación de distintos sensores el diagnóstico de estos sistemas con el fin de sanear estos sistemas.

En el estado de Puebla tenemos ríos y lagunas que están muy contaminados debido a que las aguas son contaminadas por los particulares y las empresas donde descargan aguas residuales. Actualmente han surgido grupos en el gobierno y en la sociedad que están preocupados por limpiar estos sistemas, para lo cual se requiere previamente tener un diagnóstico de los contaminantes y una vez conocidos estos planear estrategias para sanear estos sistemas.

Para poder lograr este fin es necesario desarrollar un vehículo bajo el agua dotado de distintos sensores que le permitirán medir las condiciones del sistema [3]. Y en función a las condiciones detectadas en el sistema, se podrá proceder a la implementación

de distintas estrategias para poder reducir o eliminar la contaminación presente.

En el presente proyecto de tesis se propone diseñar y construir un mini-submarino el cual va a ser guiado a distancia.

En nuestro país contamos con grandes extensiones de litorales, ríos, lagos y lagunas, lo cual representa un recurso natural muy importante para la agricultura, el turismo y en general para la sociedad, en los países desarrollados estos recursos naturales son explotados generando riqueza para la sociedad. No obstante un problema que está presente en estos sistemas en nuestro país y estado, es la contaminación.

El desarrollo de este trabajo tiene como objeto conocer los requerimientos para el diseño, desarrollo y construcción de las partes mecánicas de un mini-submarino, además esto permitirá conocer los problemas que se puedan presentar en la construcción física del prototipo y permitirá adquirir experiencia para una construcción más eficiente.

Otro factor que es relevante es el control de un vehículo bajo el agua lo cual requiere conocer su posición de manera eficiente, ya que, con esto la retroalimentación sería posible y el diseño de un control del vehículo bajo el agua sería posible. No obstante, el problema de la comunicación bajo el agua requiere una infraestructura de boyas y antenas que esta fuera de nuestro alcance.

Por lo anterior, en este proyecto de tesis se consideraron los siguientes objetivos:

Objetivo General

Diseñar y construir un mini-submarino explorador para aguas tranquilas, guiado a distancia por medio de cables.

Objetivos particulares

1. Entender el modelo matemático genérico para un vehículo bajo el agua [4]. Este objetivo es con el fin de tener una noción de las diferentes influencias externas a las que está sometido un mini-submarino cuando navega en el agua.
2. Diseñar y construir la parte mecánica del mini-submarino: el chasis, el entramado para fijar los diferentes dispositivos, dispositivo mecánico para sincronizar los motores, el lastre, propelas. El diseño de las partes mecánicas se efectuará con el programa Solidworks.
3. Realizar pruebas de inmersión, en aguas poco profundas de no más de 5m, esto con el fin de observar y corregir si existen filtraciones.
4. Implementar la parte de potencia configurando baterías con el manejo de velocidad de los motores, para caracterizar los motores y obtener los límites de funcionamiento de estos.

-
5. Realizar pruebas de navegación con el prototipo construido, para comprobar su funcionamiento.
 6. Realizar las pruebas de exploración que consistirán en medir, la profundidad y temperatura en un punto específico.
 7. Publicar los resultados obtenidos en congresos nacionales e internacionales.

Todos estos objetivos se cumplieron.

Para una mejor lectura del presente documento hemos dividido el trabajo de tesis de la siguiente manera: el primer capítulo contempla el fundamento en el cual se basa este trabajo, los mini submarinos, que son y sus características. El segundo capítulo contempla la información del diseño para cada una de las partes del prototipo y su ensamble. El tercer capítulo detalla el procedimiento seguido para elaborar la parte práctica del trabajo y los resultados obtenidos en las pruebas realizadas. Y finalmente, se presenta una sección con las conclusiones y comentarios del presente trabajo de tesis.

Índice general

Resumen	I
Introducción	III
1. Fundamentos Teóricos	1
1.1. ¿Qué es un mini-submarino?	1
1.2. Tipos de mini-submarinos	5
1.3. Modelo genérico del mini-submarino	8
1.4. Fuerzas que actúan sobre un vehículo bajo el agua	9
1.4.1. Fuerzas ambientales que actúan sobre el mini-submarino:	9
1.4.2. Fuerza de una propela	14
1.5. Elementos electromecánicos	14
1.6. Propelas	17
1.6.1. ¿Qué es una propela?	17
1.6.2. Diferentes tipos de propelas	18
1.6.3. Parámetros para elegir una propela	22
1.7. Elementos electrónicos	24
1.7.1. Arduino	24
1.7.2. Sensor MS5837-30BA	26
1.7.3. Electrónica Bluetooth	27
1.8. Teoría del error	30
2. Diseño y construcción de un mini-submarino	31
2.1. Prototipo 1	31
2.1.1. Chasis	31
2.1.2. Propelas	34
2.1.3. Lastre	40
2.1.4. Péndulo de torsión	46
2.2. Prototipo 2	48
2.2.1. Chasis	48
2.2.2. Propelas	51
2.2.3. Ensamble mecánico (chasis, propelas, etc.)	53
2.2.4. Ensamble electrónico	55

ÍNDICE GENERAL

3. Resultados	61
3.1. Medición experimental de un momento de inercia	61
3.2. Pruebas de inmersión	65
3.3. Pruebas de navegación	66
3.4. Pruebas de exploración	69
4. Conclusiones	74
A. Diagrama de flujo y Códigos	75
A.1. Diagrama de flujo para guía y exploración del minisubmarino	76
A.2. Código para la caracterización del motor	77
A.3. Código General	78
B. Difusión y publicación de los resultados	82
Bibliografía	87

Fundamentos Teóricos

En este capítulo presentamos una breve revisión de los conceptos relacionados con el tema de desarrollo de mini-submarinos, también revisamos los conceptos teóricos que se relacionan con la física y electrónica relacionados con el tema de esta tesis. En la primera sección se realiza una discusión acerca de lo que se entiende por un mini-submarino y sus aplicaciones, esto para introducirnos en los conceptos y lenguaje usado en el tema de vehículos bajo el agua. En la sección dos describimos las características de tres diferentes tipos de mini-submarinos, uno de los cuales ha sido usado para desarrollar el prototipo. En la sección tres se describe brevemente el modelo matemático genérico para un mini-submarino. En la cuarta sección se mencionan las diferentes fuerzas que se encuentran involucradas, debido a la intervención del medio ambiente. En la sección cinco se muestra el desarrollo del chasis y lastre, así como la etapa de potencia y actuadores para cada uno de estos en el prototipo. En la sección seis se explican los fundamentos del porqué se hace el uso de propelas como medio de avance e inmersión del submarino, además se presenta el diseño propuesto de las propelas que será utilizado en el prototipo. En la sección siete, se muestran los elementos electrónicos principales usados en un minisubmarino. Finalmente, en la sección 8 se muestran los elementos básicos de la teoría del error, que son necesarios para presentar las mediciones experimentales.

1.1. ¿Qué es un mini-submarino?

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 este tipo de vehículos está compuesto por un casco, propelas y lastre.

Este tipo de vehículos también reciben el nombre de 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

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

sus siglas en inglés Autonomous Underwater Vehicle) [5].

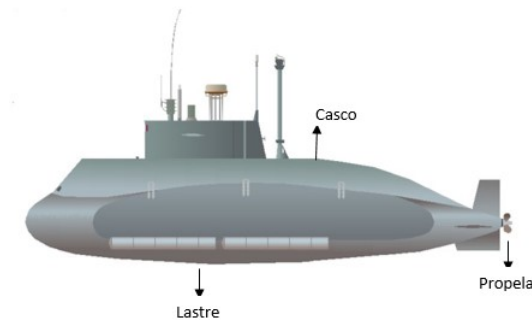


Figura 1: Piezas del mini-submarino. Lastre: peso que se agrega a una embarcación. Casco: estructura externa del mini-submarino, propela: pieza mecánica que ayuda a impulsar el mini-submarino.



Figura 2: Mini-submarino tipo ROV conocido como Roving Bat es un prototipo multi-propósitos híbrido encargado de realizar tareas de inspección y limpieza [6].

Los ROV 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, en la Figura 2 se muestra un mini-submarino ROV, usado para tomar muestras en aguas contaminadas y limpieza [6].

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 funcionamiento, 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 de cámaras e hidrófonos, lo que dará a la base de control la capacidad de poder y 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:

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 [7, 8].

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 uno no 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 [7, 8].

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. [7, 8]

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 3 se muestra un mini-submarino de tipo multipropósito, el cual se encarga de explorar las profundidades de océanos.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

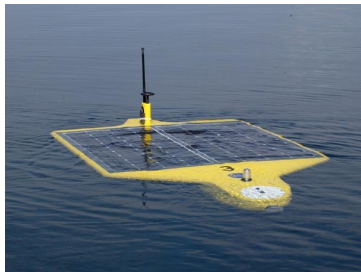


Figura 3: Mini-Submarino Tipo AUV, este vehículo submarino autónomo (AUV) funciona con energía solar. La cantidad de potencia disponible y el peso de la fuente de alimentación son factores importantes para los diseñadores AUV y usuarios. Imagen cortesía de AUVfest 2008 [9].

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 o en algunos casos pueden llegar a pesar mucho más y requerir varios sistemas externos de apoyo. Estos vehículos pueden ser equipados con diversos sistemas de sonares o sensores oceanográficos.

Entre sus principales aplicaciones incluyen [10]:

- 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. [9, 10, 11]

Tabla 1: Características de los prototipos

Nombre	Dimensiones	Tiempo de trabajo	Aplicaciones	Costo
Uss Bubul 59 (2011)	45.4 cm de largo 17.9 cm diámetro	10 horas	Navegación	No especificado
GGDA/1 (2003)	25 cm de largo 9.5 cm de diámetro	3-4 horas	Navegación	No especificado
Serafina (2004)	Ancho total 21cm Altura total 14cm	2 horas	Salvamiento y búsqueda de naves.	\$ 11843.21 MN

1.2. Tipos de mini-submarinos

De entre todos los submarinos que se encuentran en la actualidad se escogieron los siguientes tres como base para el desarrollo y construcción del prototipo. En la Tabla 1 se muestran las dimensiones, el tiempo de trabajo, y algunas aplicaciones para las que fueron hechos los prototipos.

USS Bubul 59: Este prototipo tiene 25 cm de longitud, tiene la capacidad de ser sumergido de manera estática y dinámica, Figura 4c.

Para la inmersión estática hace uso de un tanque de lastre que mediante el uso de un contenedor plástico con forma de acordeón en vacío y un servomotor, al realizar un movimiento lineal en el contenedor, este realiza succión lo que permite almacenar agua del exterior (hasta 8 gramos de agua) y así variar el peso del mini-submarino ocasionando que este sea más pesado o más ligero. Ver Figura 4a.

Para la inmersión dinámica hace uso de un sistema de engranajes, de un servomotor y dos motores como propulsores, Figura 4b. El sistema de engranajes junto con el servomotor permite rotar los motores 180° lo que permitirá dependiendo de la posición de los motores sumergirse o emerger el mini-Submarino además de que mediante el uso de los motores propulsores el mini-Submarino tiene la capacidad de navegar [12].

GGDA/01: Este prototipo (Figura 5b) al igual que el anterior tiene la capacidad de sumergirse dinámicamente mediante el uso de motores de gran velocidad y haciendo uso de un mecanismo a base de engranes y un servomotor como el USS Bubul 59.

Además dependiendo de la posición a la que se encuentren los motores, este tiene

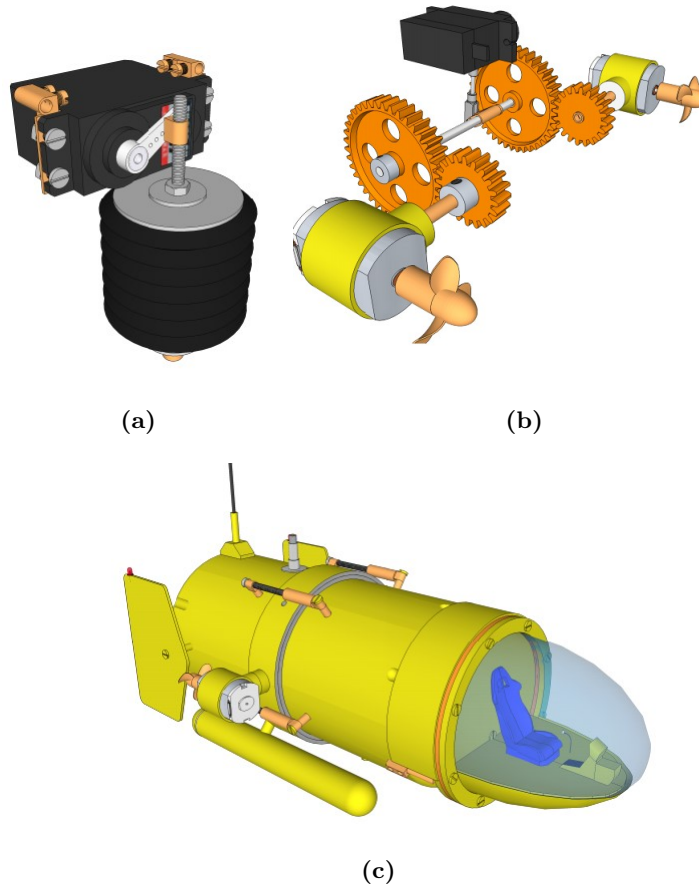


Figura 4: Uss Bubul 59. a) Tanque de lastre del mini-submarino, b) Sistema de inmersión dinámica, c) Prototipo completo.

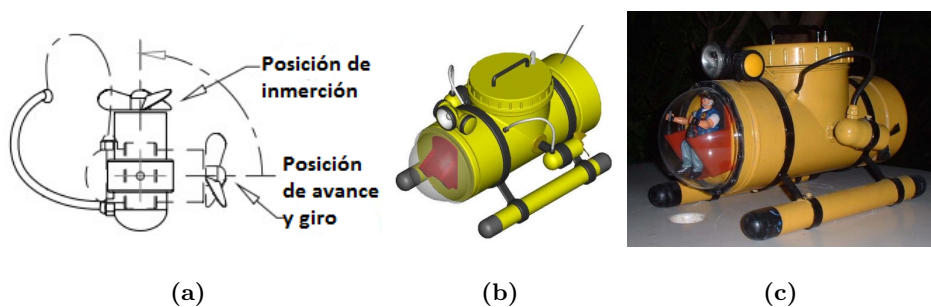


Figura 5: GGDA/01. a) Control de inmersión y avance, b) diseño del mini-submarino, c) Prototipo armado.

la capacidad de navegar.

Este prototipo, mediante la inmersión dinámica puede alcanzar hasta los 3 metros de profundidad, en la Figura 5c se puede observar el mini-submarino completo [13].

SERAFINA: La Universidad Nacional de Australia diseño un AUV, como se muestra en la Figura 6 consta de cinco motores, un CPU (Motorola MPC 555 Power) un sonar (aimar 25-162-01 200 KHz), acelerómetros (26PCB Honeywell) y controladores de motores [14].

Las especificaciones de Serafina son:

- Velocidad de avance 1m/s.
- Velocidad de ascenso 0.5m/s.
- Velocidad roll 360°/s.
- Velocidad Pitch 180°/s.
- Velocidad Yaw 90°/s.



Figura 6: Mini-submarino Serafina. Este prototipo cuenta con un sonar el cual se encuentra en la parte delantera y puede llevar a cabo labores de salvamento y búsqueda de embarcaciones hundidas [14].

El diseño de un casco con cinco motores ofrece una buena integridad estructural, tres motores son ocupados para controlar la profundidad y dos para el movimiento horizontal. Todos los componentes se encuentran en el casco por lo que las conexiones son mínimas [14].

Del análisis de estos tres prototipos se eligieron las características del prototipo Uss bubul y GGDA/1 para diseñar el prototipo que se presenta en el proyecto de tesis, ya que se considera que la característica principal del GGDA/1 es el diseño del casco ya que provee mayor estabilidad, del modelo Uss Bubul se eligió el diseño interno que consta

de un eje con un servomotor para poder cambiar el sentido de los motores y así hacer uso de menos recursos para el manejo del mini-submarino, esto en comparación con el ultimo prototipo (Serafina) que hace uso de cinco motores, dos en forma vertical para el descenso y dos para el avance en posición horizontal.

1.3. Modelo genérico del mini-submarino

El modelo dinámico del mini-submarino se deduce a través de la formulación de Newton-Euler [15, 16], que se basa en las siguientes expresiones:

$$\frac{d\mathbf{P}_c}{dt} = \mathbf{f}_c, \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{h}_c}{dt} = \mathbf{m}_c, \quad (2)$$

donde $\mathbf{P}_c$ es el vector momento lineal del centro de masas del mini-submarino, $\mathbf{f}_c$ es la fuerza resultante de fuerzas ambientales y de los actuadores que actúan sobre el mini-submarino, $\mathbf{h}_c$ 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 5 m en aguas tranquilas.

Finalmente de emplear las ecuaciones (1) y (2) [16], se obtienen las ecuaciones dinámicas que describen el movimiento del mini-submarino:

$$m [\dot{u} - vr + \dot{w}q - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q})] = X, \quad (3)$$

$$m [\dot{v} - wp + \dot{u}r - y_G (r^2 + p^2) + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (qp + \dot{r})] = Y, \quad (4)$$

$$m [\dot{w} - uq + \dot{v}p - z_G (p^2 + q^2) + x_G (rp - \dot{q}) + y_G (rq + \dot{p})] = Z, \quad (5)$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr + m [y_G (\dot{w} - uq + vp) - z_G (\dot{v} - wp + ur)] = K, \quad (6)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z) rp + m [z_G (\dot{u} - vr + wq) - x_G (\dot{w} - uq + vp)] = M, \quad (7)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x) pq + m [x_G (\dot{v} - wp + ur) - y_G (\dot{u} - vr + wq)] = N, \quad (8)$$

donde X, Y, Z son las fuerzas ambientales y las fuerzas de los actuadores que experimenta el mini-submarino y K, M, N son los pares aplicados generados por las fuerzas X, Y, Z. En las ecuaciones (6, 7, 8) aparecen parámetros que caracterizan al sistema y que son los momentos de inercia a lo largo de los ejes principales de simetría I_x, I_y, I_z .

En la expresión (6),(7) y (8), modelo de genérico de un vehículo bajo el agua, $[u,v,w]$ son las componentes de la velocidad lineal del sistema de referencia que se a anclado

en el mini-submarino, mientras $[p, q, r]$ son las componentes de la velocidad angular del sistema de referencia anclado en el mini-submarino 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 formulación del modelo matemático del mini-submarino hacemos las siguientes consideraciones: a) Fijo a la tierra consideramos el sistema X, Y, Z como inercial, b) Fijo al cuerpo consideramos el sistema $[X_o, Y_o, Z_o]$, ver Figura 7.

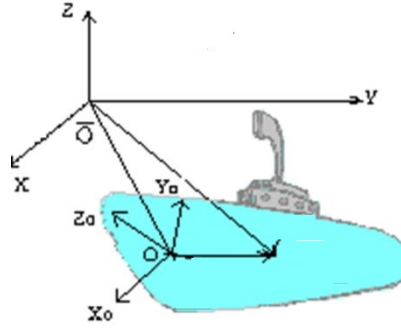


Figura 7: Sistema fijo al cuerpo e Inercial [16].

1.4. Fuerzas que actúan sobre un vehículo bajo el agua

Las perturbaciones ambientales pueden afectar el movimiento y estabilidad de un vehículo, es por tanto que en esta sección narraremos algunas de las fuerzas que influyen en un mini-submarino.

1.4.1. Fuerzas ambientales que actúan sobre el mini-submarino:

1. *Fuerza de flotación, F_f* : ésta se calcula en base al principio de Arquímedes que nos dice: la fuerza de flotación es igual al peso del líquido desalojado por el cuerpo sumergido (mini-submarino) y que se expresa de la siguiente manera:

$$F_f = m_l g, \quad (9)$$

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:

$$m_l = V_s \rho_f, \quad (10)$$

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

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

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 8.

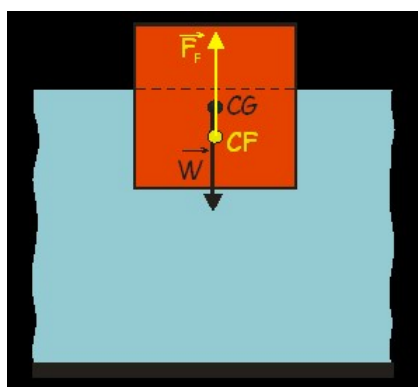


Figura 8: $F_f \neq w$ (en el equilibrio).

La estabilidad de un cuerpo parcialmente 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:

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, ver Figura 9.

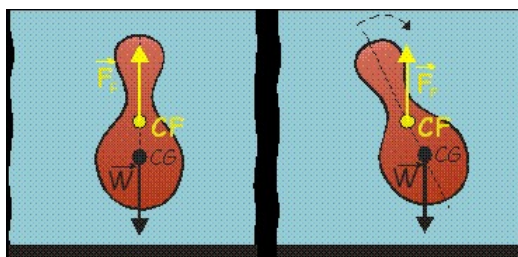


Figura 9: Equilibrio estable.

Equilibrio inestable. Cuando el par de fuerzas tiende a aumentar el desplazamiento angular producido. Esto ocurre cuando el cuerpo tiene densidad en la parte superior del cuerpo, de manera que el centro de gravedad se encuentra por encima del centro de flotación, ver Figura 10.

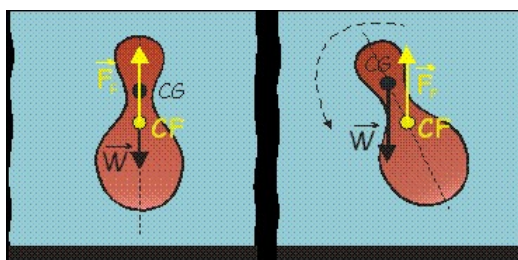


Figura 10: Equilibrio inestable.

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, ver Figura 11.

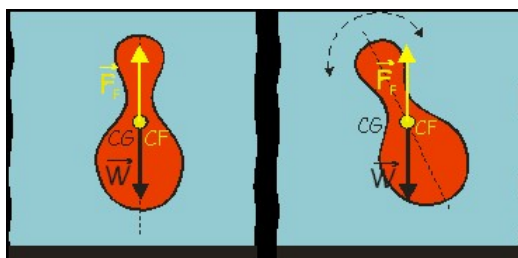


Figura 11: Equilibrio neutro.

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

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

es válida para alturas pequeñas en comparación con el radio de la tierra (6500 Km aproximadamente), ésta fuerza es conocida como el peso de un objeto, y ésta dada por:

$$F_p = m_s g, \quad (11)$$

3. *Fuerza de masa añadida.* En mecánica de fluidos ésta 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, pensando en realidad “Todo” el fluido debe ser acelerado [17]. Puede ser mostrado que la fuerza de masa añadida, para una partícula esférica sumergida en un líquido no viscoso ésta dada por:

$$F_a = \frac{\rho_f V_p}{2} \left(\frac{Du}{Dt} - \frac{dv_p}{dt} \right), \quad (12)$$

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.

$$m_a \frac{dv_p}{dt} = \sum F_i + \frac{\rho_f V_p}{2} \left(\frac{Du}{Dt} - \frac{dv_p}{dt} \right), \quad (13)$$

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. Cambiando la derivada de la velocidad de la partícula desde el lado derecho al lado izquierdo obtenemos:

$$\left(m_a + \frac{\rho_f V_p}{2} \right) \frac{dv_p}{dt} = \sum F_i + \frac{\rho_f V_p}{2} \frac{Du}{Dt}, \quad (14)$$

De este modo la partícula es acelerada como si tuviera una masa añadida de 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 considerando una masa efectiva como la suma de la masa y la masa añadida. Esta suma es comúnmente 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:

$$F_p = \left(m_p + \frac{\rho_f V_p}{2} \right) a_p, \quad (15)$$

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 dependiendo de la dirección de movimiento del cuerpo. No todos los elementos en el tensor de masa añadida tendrán una dimensión de masa [16, 17].

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 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 [17].

$$F_v = -\mu\eta v_p, \quad (16)$$

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

$$F_v = -C_u v_p, \quad (17)$$

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.

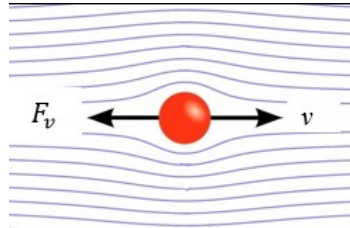


Figura 12: Fuerza viscosa. Muestra la interacción de las fuerzas en una partícula dentro de un fluido.

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

1.4.2. Fuerza de una propela

Fuerza de los actuadores: Todos los vehículos mini-submarinos usan propelas para obtener velocidad de avance. Para el sistema de control básico de un vehículo 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) [18].

$$F = K_1 w^2, \quad (18)$$

1.5. 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 mini-submarinos 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 13:

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

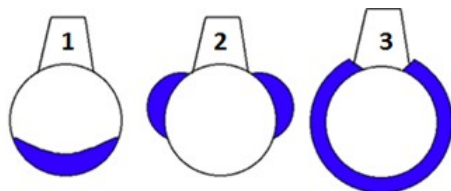


Figura 13: Diferentes localizaciones del tanque de lastre. 1) casco único. 2) tanques de lastre exterior, 3) Doble casco.

Una de las principales desventajas de tener este tipo de tanques dentro del submarino es el espacio que ocupa, ya que este podría ser ocupado para más personal o

equipamiento [19]. 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, ver Figura 14.

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.



Figura 14: Ángulos de los planos de inmersión dinámica.

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 depósito sellado capaz de permanecer con un aumento de presión significativo, ver Figura 15.

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 comprimido, el tanque no puede ser llenado por completo, solo aproximadamente al 80 de su capacidad [19, 20].

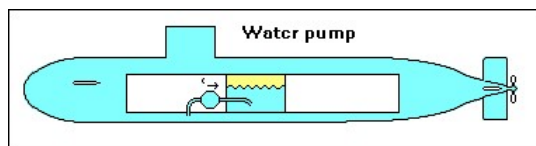


Figura 15: Tanque de lastre a presión.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2. *Tanque de lastre de pistón.* El tanque de lastre de pistón consiste en un cilindro y un pistón movible haciendo semejanza a una jeringa. El pistón se puede mover de manera lineal con un tornillo, una rueda dentada y un motor, ver Figura 16.

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.

Para expulsar el agua del tanque el motor girara en sentido contrario ocasionando que el pistón se mueva de manera lineal en sentido contrario y así expulsando el agua del contenedor [19, 20].

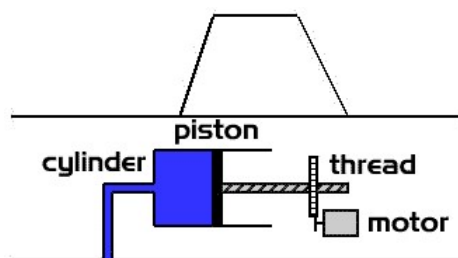


Figura 16: Tanque de lastre de pistón.

En la siguiente Tabla 2 se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de los dos métodos de inmersión estática, por medio de una bomba y usando un pistón.

Tabla 2: Características de los tanques de lastre.

Tipo de lastre	Ventajas	Desventajas
Tanque de lastre a presión.	Puede sumergirse verticalmente sin necesidad de alguna velocidad de avance. control puede ser más preciso	contenedor debe ser más resistente por las altas presiones Al requerir 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. Costo más reducido en comparación al tanque de lastre a presión	El contenedor debe ser más resistente por las altas presiones Mayor desgaste al ser un sistema más mecánico. Posible presencia de fugas de agua.

1.6. Propelas

Diversos vehículos submarinos son conocidos, como los submarinos, UV turísticos, torpedos y UV para la investigación del lecho marino.

Un vehículo submarino no tripulado principalmente realiza misiones de exploración que son difíciles de llevar a cabo por los hombres en ecosistemas submarinos. Estos pueden ser empleados para diversas misiones como mantenimiento o reparación de estructuras submarinas, la detección y remoción de minas navales. Todos estos usan propelas para obtener velocidad de avance.

1.6.1. ¿Qué es una propela?

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 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.

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, pero en el sistema propulsivo del buque: las propelas marinas y el fenómeno de la cavitación [22] 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 [21].

Las partes de la Propela se presentan en la Figura 17:

- Eje: barra donde se monta la hélice y que la hace girar.
- Núcleo: cuerpo central donde se afirman el eje a las aspas.
- Capucete: pieza en forma de capuchón que protege el agujero para que no entre agua.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- Aspa: piezas que salen del núcleo. Produce empuje de la embarcación mediante el giro.

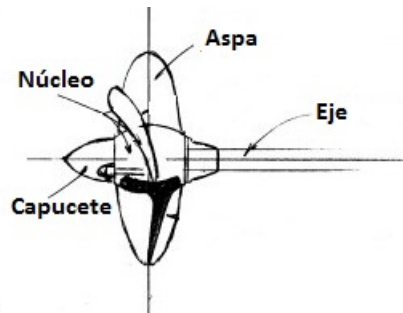


Figura 17: Partes de una propela.

1.6.2. 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 [22].

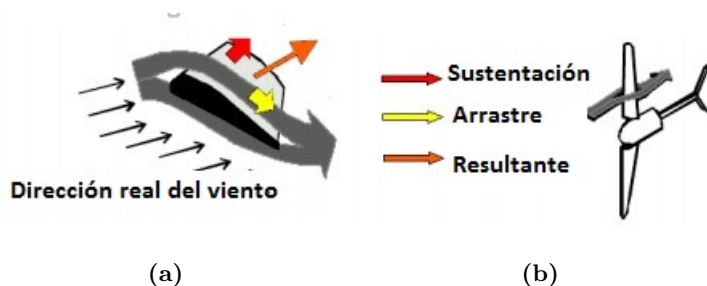


Figura 18: Fuerzas de sustentación y arrastre.

Según este principio, el aire que es obligado a fluir por las caras superior e inferior

de una placa o perfil inclinado (ver Figura 18) 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 19a.

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 19a) y la acción del "viento" (V en la Figura 19a) 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 20. 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.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

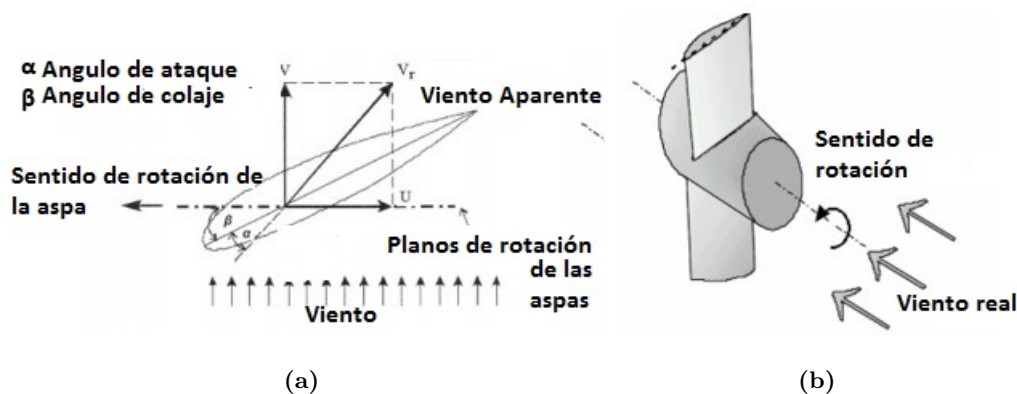


Figura 19: a) Efectos del viento sobre un elemento de aspa (pala), b) Viento real.

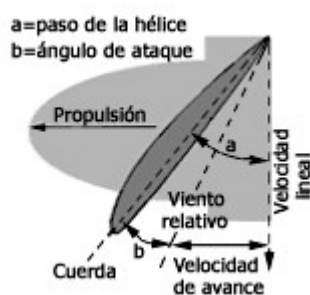


Figura 20: Hélices para aeroplanos.

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 [23].

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 21. 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 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 [24].

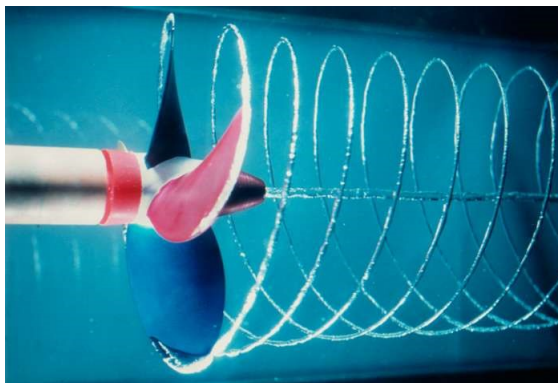


Figura 21: Propela en movimiento, generando una fuerza de empuje con el agua.

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 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 [24].

Propelas para submarinos. Los submarinos utilizan propelas y aletas en su cola para poder moverse en ciertas direcciones. Éstas 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 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 aspas, capaz de distribuir la potencia del motor entre ellas, para tener una superficie suficiente para

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Tabla 3: Características de las propelas por su uso

Tipo de propelas o hélices	Numero de aspas	Ancho de aspas	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 aspas	No especificado
Mini-Submarino	3 a 5	Proporcional al tamaño de la propela.	No especificado

desplazar todo el volumen de agua que la potencia del motor permita.

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 aspas.

En la siguiente Tabla 3 se hace un resumen de las características principales de los 4 tipos de propelas.

1.6.3. Parámetros para elegir una propela

Número de aspas. En general, a una velocidad determinada de rotación del eje, cuanto menos aspas tenga una propela, mejor será. Sin embargo, si tiene menos aspas, 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). 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 [25].

Superficie de la aspas. Una propela con aspas angostas [25] resulta más eficiente que una propela con aspas anchas. 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 22 se muestran diferentes tamaños de aspas en la propela [25].

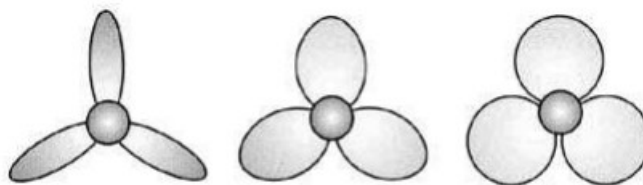


Figura 22: Relación creciente entre el área de superficie de las aspas y el área del disco de la propela.

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 y son más propensas a la cavitación [25].

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 [25].

Angulo. 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 ésta 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 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 veloci-

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

dad 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.

1.7. Elementos electrónicos

Hardware empleado fue Arduino, una aplicación para android usando bluetooth (electrónica bluetooth) y un sensor de presión (MS5837-30BA), el cual se utilizó para el funcionamiento del prototipo y la toma de datos. A continuación se detallan además de los empleados, otros que se consideraron y que podrían haber enriquecido su funcionamiento.

1.7.1. 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 [26].

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 [26].



Figura 23: a) formato DIP, b) formato SMD, [26]

La primera es un microcontrolador Atmega en formato DIP. Y la segunda dispone de un microcontrolador en formato SMD. Nosotros nos decantaremos por 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 nosotros indiquemos lo contrario. Arduino también dispone de 6 pines de entrada analógicos que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 bits, [26].

Pines especiales de entrada y salida:

- RX y TX: 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/Esclavo.
- I 2C: Permite establecer comunicaciones a través de un bus I 2C. El bus I 2C 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 [26].

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

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

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, [26].

1.7.2. Sensor MS5837-30BA

Existen diversos sensores encargados para hacer mediciones de temperatura y presión, sin embargo son pocos los que se pueden utilizar bajo el agua debido a la hermeticidad que necesitan tener.

Este sensor es un módulo de sensor de código abierto y de bajo costo que permite superponer la profundidad, el rumbo de la brújula, el balanceo y el tono muy precisos en el flujo de la cámara en la cabina de OpenROV. Tener esta telemetría adicional ayudará enormemente con la navegación, recolectando datos científicos relevantes, y permite las órdenes de control de lazo cerrado que harán el OpenROV mucho más fácil volar como el asimiento de la dirección de la brújula y la suspensión de la profundidad. Este módulo se añade a los cables auxiliares I2C y se puede integrar durante el proceso de construcción o después de completar la construcción [27], (Figura 24).



Figura 24: Sensor MS5837-30BA

El módulo de sensor con propiedades de piezoresistividad. Incluye un sensor de presión de alta linealidad y un ADC de $\Delta\Sigma$ de 24 bits de potencia extremadamente baja con coeficientes internos calibrados en fábrica. Proporciona un valor preciso de presión digital y temperatura de 24 bits y diferentes modos de operación que permiten al usuario optimizar la velocidad de conversión y el consumo de corriente. Una salida de temperatura de alta resolución permite la implementación en sistemas de medición de profundidad y función de termómetro sin ningún sensor adicional [27], (Figura 25).



Figura 25: Sensor MS5837-30BA, parte pizoresistiva [27]

El MS5837-30BA puede conectarse a prácticamente cualquier microcontrolador. El protocolo de comunicación es sencillo, sin necesidad de programar registros internos en el dispositivo. La protección de gel y la tapa antimagnética de acero inoxidable hacen que el módulo sea resistente al agua. Esta nueva generación de módulos de sensores se basa en la tecnología líder de MEMS y en los últimos beneficios de MEAS Suiza, experiencia comprobada y know-how en la fabricación de alto volumen, que ha sido ampliamente utilizada durante más de una década [27].

BENEFICIOS

- Paquete de cerámica - metal, 3.3 x 3.3 x 2.75mm
- Módulo de alta resolución 0.2 mbar
- Conversión rápida hasta 0,5 ms
- Baja potencia, 0,6 μA (espera ¡0,1 μA a 25 ° C)
- Sensor de presión digital integrado (24 bit $\Delta\Sigma$ ADC)
- Tensión de alimentación 1,5 a 3,6 V
- Rango de funcionamiento: 0 a 30 bar, -20 a +85 ° C
- Interfaz I2C
- No hay componentes externos (oscilador interno)
- Excelente estabilidad a largo plazo
- Herméticamente sellable para dispositivos exteriores

1.7.3. Electrónica Bluetooth

Controle su proyecto electrónico con un dispositivo Android. Esta aplicación se comunica mediante Bluetooth a un módulo HC-06 o HC-05 Bluetooth en su proyecto. También puede utilizarse con Raspberry Pi o cualquier otro sistema de prototipado rápido en el que haya incluido un módulo Bluetooth adecuado para su proyecto [28].

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

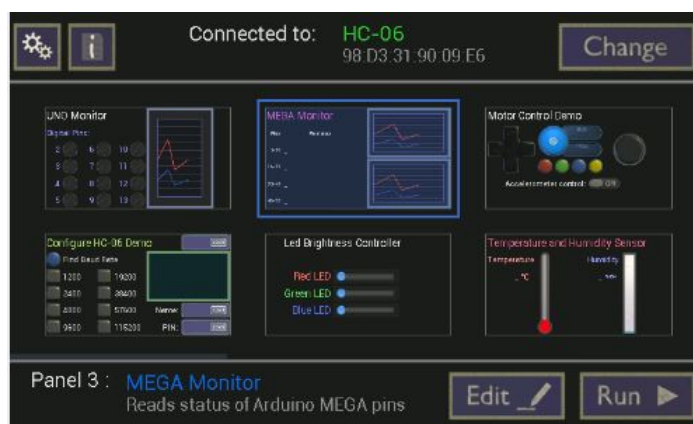
- Ideal para aprender electrónica de una manera divertida.
- Ideal para el prototipado rápido de una idea nueva.
- Ideal para exponer su proyecto.

Algunas habilidades electrónicas requeridas. Requiere un dispositivo Android con capacidad Bluetooth habilitada. NO funciona con módulos Bluetooth Low Energy.

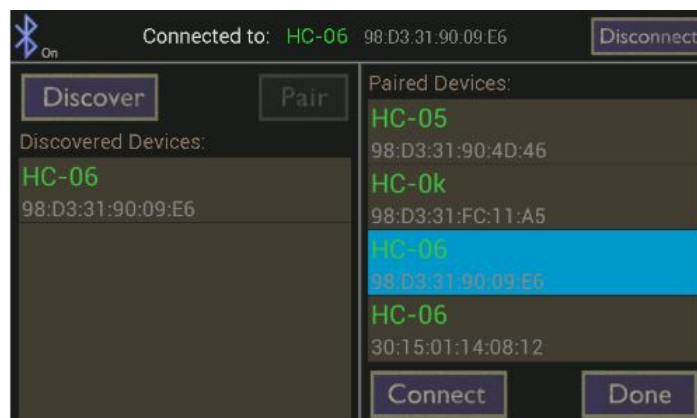
Gran selección de controles disponibles, incluyendo botones, interruptores, deslizadores, pastillas, luces, medidores, terminales, acelerómetros y gráficos, arrastrar y soltar en la cuadrícula del panel. Contiene 20 paneles personalizables disponibles. Se pueden Importar / Exportar paneles para compartirlos [28]. Puedes utilizar:

- Brillo LED
- PWM con control deslizante
- Demostración de coches RC
- Controles de botones básicos
- Persistencia de la visión
- Control de texto
- Terminales de envío y recepción
- Sensor de Distancia Ultrasónica
- Indicador de Luz
- UNO Monitor
- Temperatura y humedad
- Medidor de temperatura
- Configurar HC-06 Demo
- En caso de que desee cambiar la velocidad de transmisión
- Motor Control Demo
- Acelerómetro y controles de la almohadilla

Algunas capturas de pantalla de los paneles que se pueden utilizar se muestran en la Figura 26.



(a)



(b)



(c)

Figura 26: a) Ejemplo de diversos paneles, b) Selección del dispositivo de conexión, c) Editor de panel

1.8. Teoría del error

Estamos conscientes en que existe un error al realizar las mediciones en un experimento, y por consecuencia hay una discrepancia con los resultados teóricos. En esta sección no pretendemos presentar todo un análisis del tratamiento matemático de datos experimentales, pero si creemos que es importante hacer una estimación del porcentaje de error cometidos al realizar una medición experimental como la que pretendemos hacer con nuestro mini-submarino explorador, para conocer una estimación de la confiabilidad de nuestras mediciones.

En la teoría de los errores se distinguen tres categorías: errores de aparato, sistemáticos y accidentales. Los errores de aparato se refieren a la incertidumbre asociada con la graduación del aparato. Los errores sistemáticos se asocian a las irregularidades que se presentan de manera constante al realizar las mediciones, son aquellos que están vinculados con el estado del medio ambiente en el que se realizan los experimentos, errores debidos a las particularidades del experimentados (errores subjetivos o personales), y los errores debidos a la inexactitud de las constantes de graduación de los instrumentos y precisión limitada de las constantes universales. Mientras que, los accidentales se refieren a causas o eventos azarosos que influyen en la medición, como por ejemplo, algún cambio brusco de la temperatura [29]. Son muchos los factores que se deben de tomar en cuenta, en la teoría de errores es aceptable solo tomar en cuenta los errores cometidos debidos a los instrumentos de medición, el cual para una medición indirecta el error absoluto se puede estimar por medio de la siguiente expresión [29],

$$\epsilon_{ap}[F] = \sum_i \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \right| \epsilon_{ap}[x_i] \quad (19)$$

En esta expresión $\epsilon_{ap}[F]$ es el error absoluto del aparato de la cantidad física F , mientras que, $\epsilon_{ap}[x_i]$ es el error absoluto del aparato de la cantidad física x_i . De este modo podemos calcular el error de aparato de una cantidad que depende de otras. Una estimación del error absoluto de un aparato tomar la mínima división del aparato y dividir esta entre dos.

Diseño y construcción de un mini-submarino

En este capítulo se mostrará el desarrollo y diseño llevado a cabo para la construcción de la estructura del prototipo de mini-submarino. Primero se describirá el proceso que se realizó, desde el diseño en solidworks, hasta la construcción final de lo que será el chasis que es toda la parte del exterior del submarino, o también llamada casco. Posteriormente se especificará el proceso seguido para proponer el diseño de las propelas, las cuales proveerán de fuerza de avance al mini-submarino. Después se explicará el diseño y construcción de cada uno de los dos prototipos de tanque de lastre realizados. Y para finalizar se detallará la construcción del péndulo de torsión que permitirá conocer los momentos de inercia del chasis del mini-submarino.

2.1. Prototipo 1

En esta sección se describe el ensamblaje del chasis, la propela y el tanque de lastre para el prototipo 1 (ver Figura 27). El cual se desarrolló a partir de la combinación de dos prototipos existentes (GGDA/1 y Uss Bubul), los cuales se detallaron en el capítulo 1.

2.1.1. Chasis

Fueron seleccionadas las características esenciales de cada prototipo, las cuales proporcionan ventajas para su prototipo. Uss bubul su principal ventaja es una estructura de un eje con un servomotor el cual hace girar al eje y poder cambiar la posición de los motores ya sea vertical u horizontal, en el prototipo GGDA/1 su principal característica que fue elegida para implementarla en el prototipo fue el diseño completo del chasis por su estabilidad y la estética en el diseño, estas estructuras se muestran en el capítulo 1.



Figura 27: Estructura del prototipo 1

Para la construcción del casco del prototipo se realizó en base al modelo GGDA/1 tomando en cuenta las medidas de este mismo, este posee un diámetro aproximado de 7 pulgadas. Como se requiere que el casco sea resistente a presiones altas en el agua, se hizo uso de una T de pvc hidráulico por la capacidad de soportar altas presiones.

En los tres extremos de la T de PVC se colocaron tres tapones herméticos para sellar la parte interna del mini submarino y así evitar posibles filtraciones. Posteriormente en uno de los tapones de los extremos se optó por colocar una cúpula hecha a base de acrílico extruido.

Una vez realizado lo anterior, con el fin de hacer estable el casco, se implementaron dos patines hechos de pvc y a los cuales les fueron colocados unos tapones en cada uno de sus extremos. Con la finalidad de poder fijar los patines al casco, se realizó una estructura a base de metal que es fijada en el casco y que posee unas soleras soldadas a las cuales fueron soldados unos aros de metal del diámetro del pvc de los patines para poder colocarlos.

Después se inició el diseño y construcción de las cubiertas de los motores y del mecanismo de manipulación de estos. El cual consta de la unión de un balero de alternador de auto (Figura 28a), con una estructura que se realizó para evitar las filtraciones de agua y poder hacer girar un eje, la cual tiene en su interior en la union del balero y la pieza un canal para un oring y otro canal para otro oring donde entra el eje, este tiene como fin sostener los motores por medio de una base, para poder hacer el cambio de posición de los mismos (Figura 28- b, c y d). Esto se realizó con el fin de conocer las dimensiones que abarcara el sistema y así también proponer la forma de las uniones para unir los motores al casco.

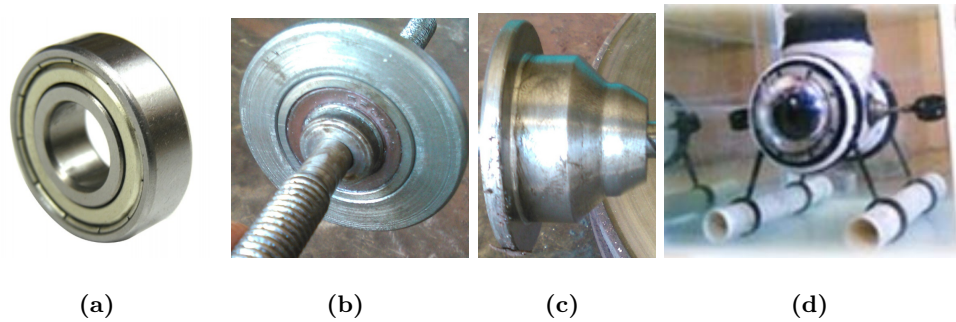


Figura 28: Estructura de los motores. a) Balero de alternador, b) union de balero con pieza para sostener el eje, c) pieza para evitar filtraciones, d) Eje de posicionamiento para los motores.

Posteriormente se procedió a realizar un barreno en cada uno de los lados de la parte superior de la T de PVC, estos tienen como fin sostener la estructura para cada una de las estructuras motores.

Finalmente se realizó una estructura interna de entramados a base de MDF (Medium Density Fibreboard) y PLA (Poliácido láctico) con el fin de tener un soporte para todos los elementos internos que llevara el mini submarino, como se observa en la Figura 29. Esta estructura tiene la capacidad de ser reacomodada en función al espacio interno requerido y tomando en cuenta el tamaño de los elementos que serán colocados dentro.

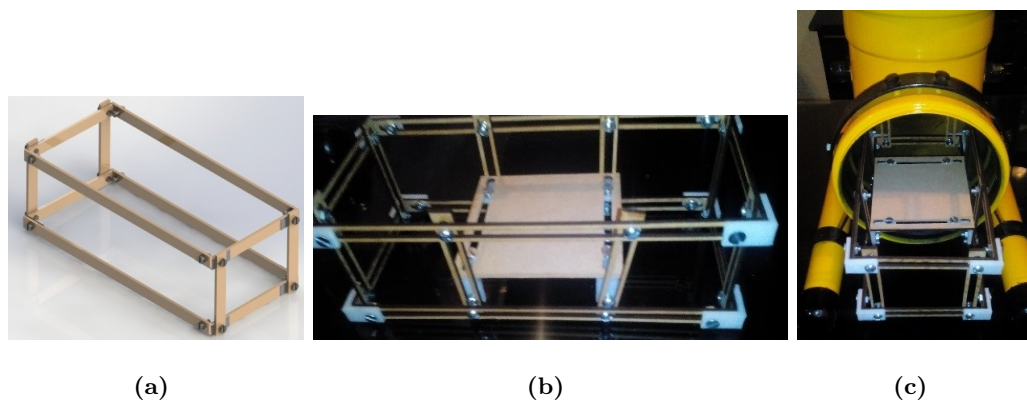


Figura 29: Estructura interna. a) Diseño de la estructura, b) Estructura construida, c) Estructura montada en el prototipo.

2.1.2. Propelas

En esta sección se describe el diseño y construcción de las propelas que usa el prototipo de mini-submarino. Para la construcción de la propela fue necesario revisar ciertos parámetros que se mencionan detalladamente en el capítulo 1.

Se diseñó una propela con 4 aspas ya que en la investigación que se realizó sobre los parámetros, el número de aspas es importante para ayudar a desplazar todo el nivel de agua que la potencia del motor permite. Sin embargo la que se implementara en el prototipo será de 3 aspas ya que el diseño propuesto originalmente no pudo realizarse en un material resistente a la fuerza que se genera en el agua.

Para obtener un ángulo simétrico que permita a la propela funcionar perfectamente en cualquier sentido de giro se decidió usar la siguiente forma para la sección transversal, la terminación en punta y la ligera inclinación que se le dá a la línea base es lo que define esta característica. Es necesario hacer énfasis en que la línea que está vertical en realidad es solo una parte inicial para hacer el aspa, ya que al hacer los redondeos pertinentes esta se convierte en una curva (Ver Figura 30a).

El número de aspas para propelas de submarino van de los 3 a 5, se eligió hacer una propela de 4 aspas para conservar un estado promedio de las recomendaciones. El número de aspas que se pueden modelar correctamente dependen directamente del diámetro del cuerpo de la propela y de la inclinación de la espira, esta se definió considerando los parámetros de largo y número de revoluciones (Ver Figura 30b).

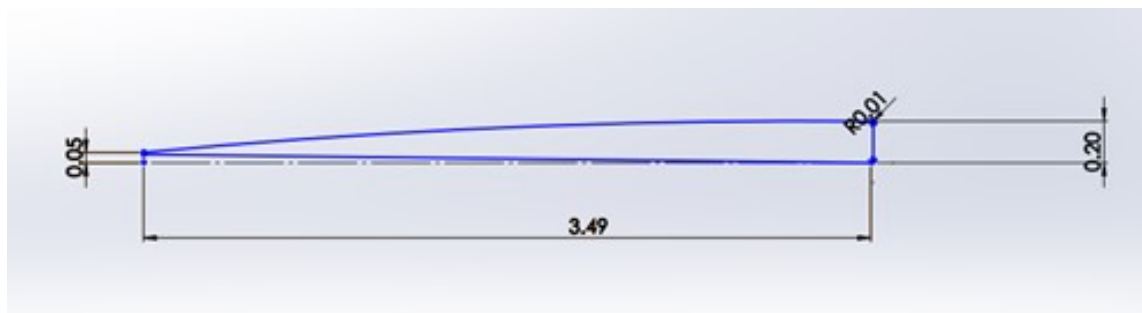
Al hacer el barrido del boceto de la sección transversal a través de la espira se obtiene el siguiente resultado (Ver Figura 30b).

Esto constituye el previo del aspa, en la Figura de la izquierda se observa el barrido (Figura 31a) y la sección transversal, en la de la derecha, se aprecia cómo es que se forma el mismo ángulo de inclinación tanto para la parte superior como para inferior (Figura 31b).

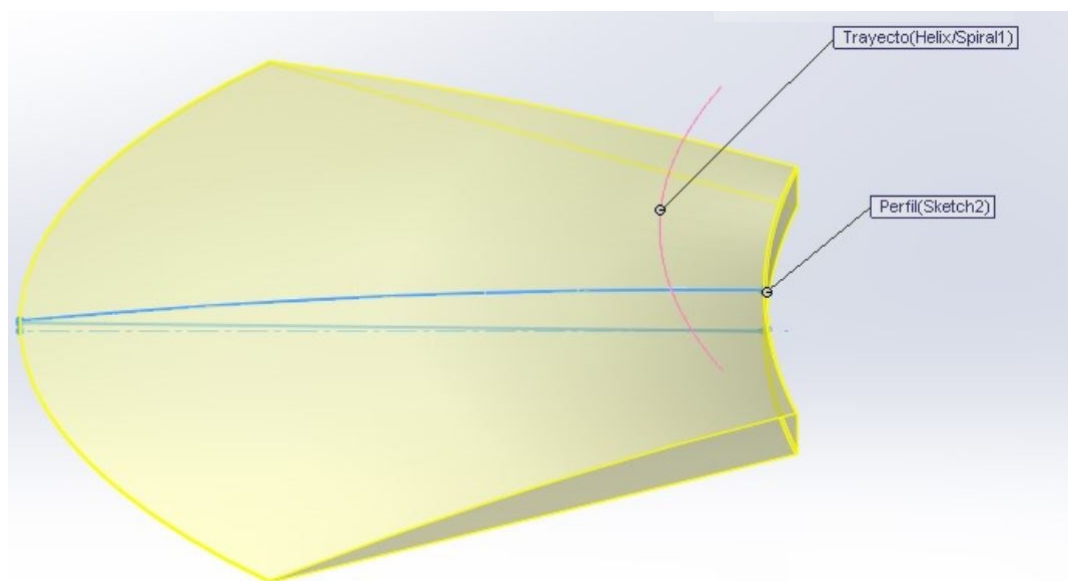
El último paso es idear la forma que le dará forma al aspa y le agregará algunas propiedades extra a la forma en que fluye el agua a través de ella.

Con la geometría que se muestra en la Figura 32a, se logró que el flujo de agua entre por la parte más curva y se desplace hasta la parte donde termina en una curva de menor diámetro (punta), al hacer este recorrido con esta geometría se obtiene un mayor impulso.

Es recomendable agregar una punta cuya función será romper con la resistencia del agua. (Ver Figura 33)

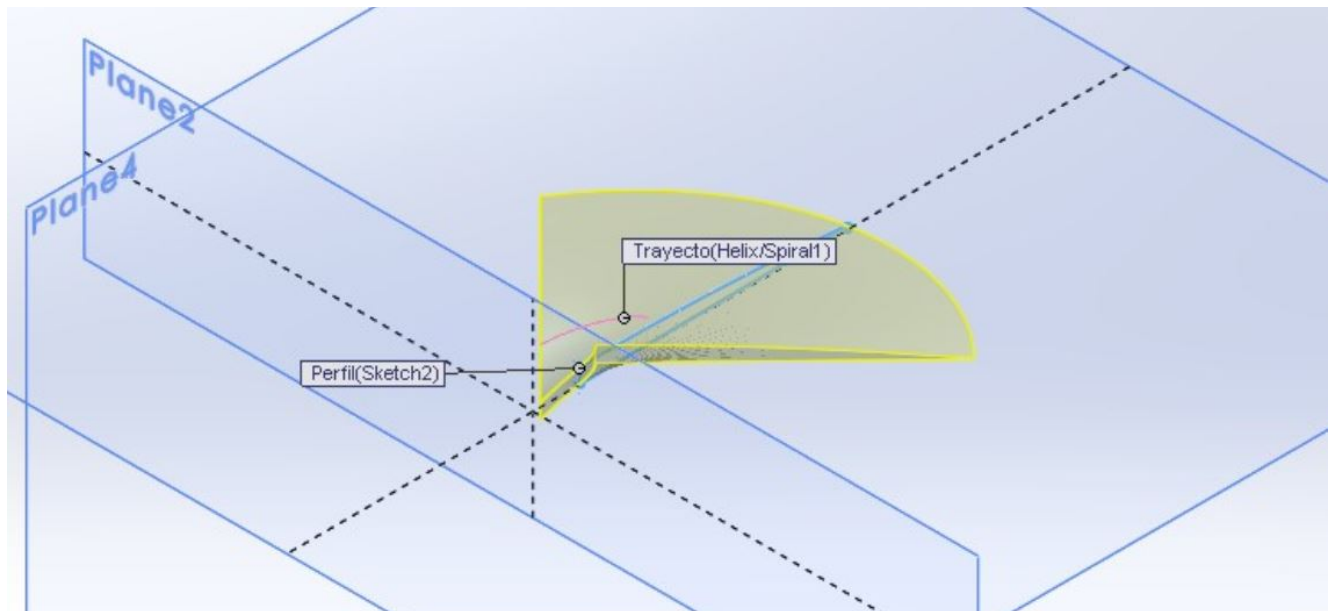


(a)

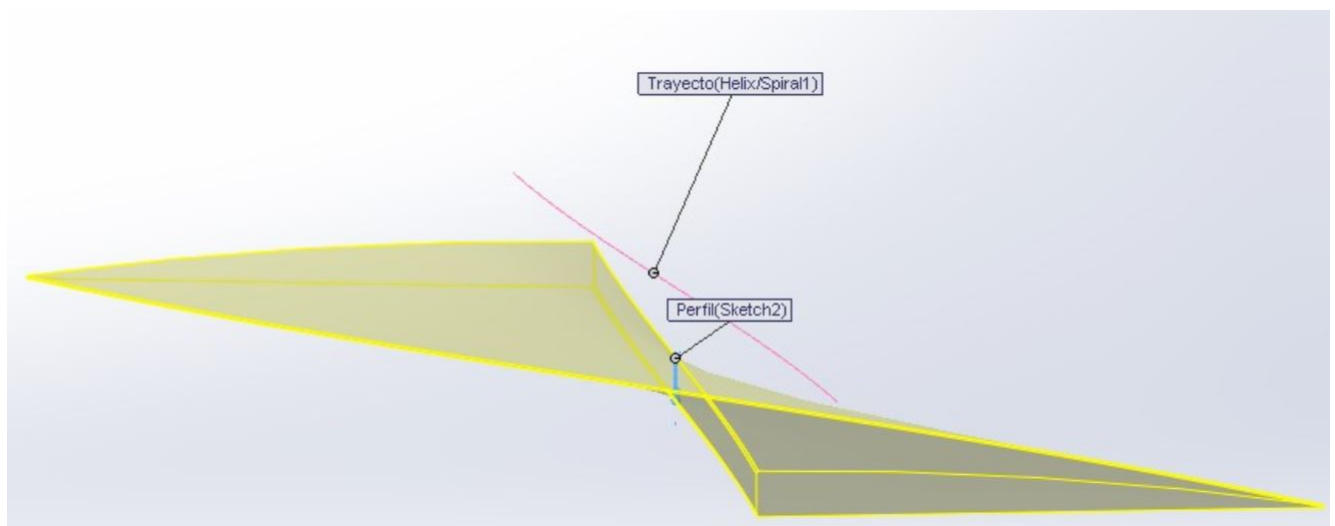


(b)

Figura 30: . En esta imagen se muestran. a) diseño del aspa, b) barrido de la sección construida.



(a)



(b)

Figura 31: En esta imagen se muestran dos aspas. a) Barrido y sección transversal, b) ángulo de inclinación del aspa.

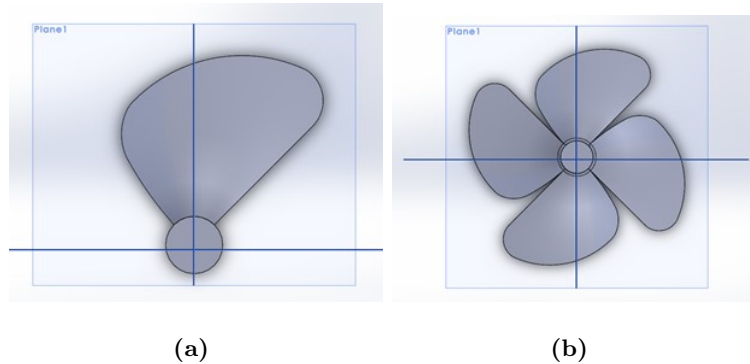


Figura 32: En esta imagen se presentan dos vistas de la propela. a) Vista final del diseño de un aspa, b) vista superior de las aspas.

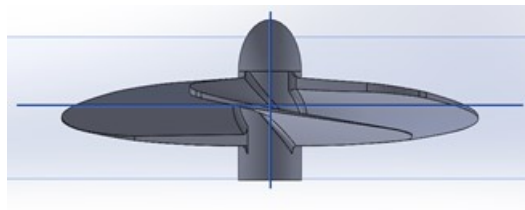


Figura 33: Punta de la propela para romper la resistencia del agua.

Y finalmente se hacen los barrenos correspondientes para el eje del motor al que será fijado. (Ver Figura 34)

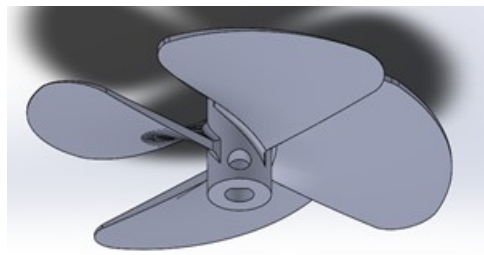


Figura 34: Barrenos para fijar propela al eje del motor.

Como complemento, se agregará un “conducto” para que en conjunto aumente el impulso en el agua.

Al diseño final, se le hicieron algunas pruebas de resistencia, sometiéndolo a fuerzas centrífugas en el aire (las pruebas son limitadas debido a que el software no tiene las herramientas necesarias para hacer un estudio adecuado) con la finalidad de exponerlo a condiciones que podrían dañarla.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO

En la Figura 35 de abajo se muestra el mallado de la pieza, esto es una herramienta de elemento finito que sirve para determinar posteriormente en donde existen esfuerzos que son destructivos.

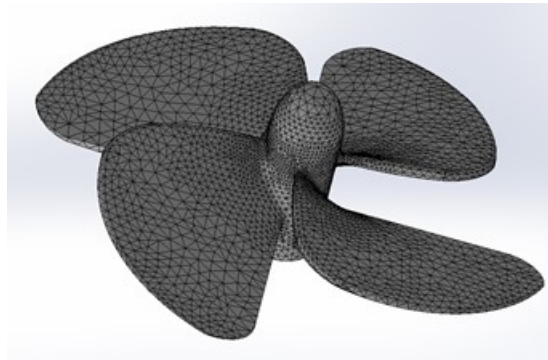


Figura 35: Elemento finito aplicado al diseño de la propela.

En la siguiente imagen se muestra los puntos de sujeción (Figura 36a) y el tipo de fuerza a la que se sometió (Figura 36b).

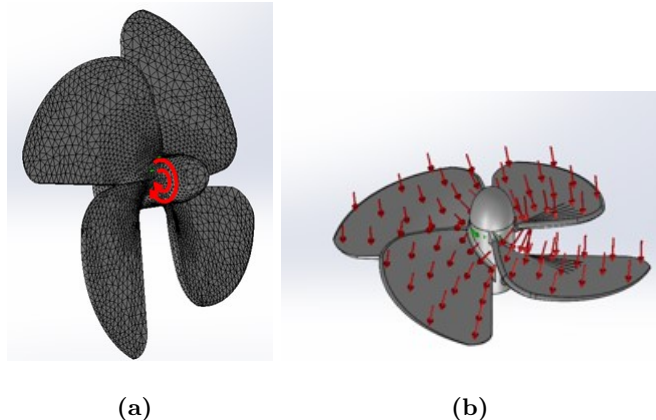
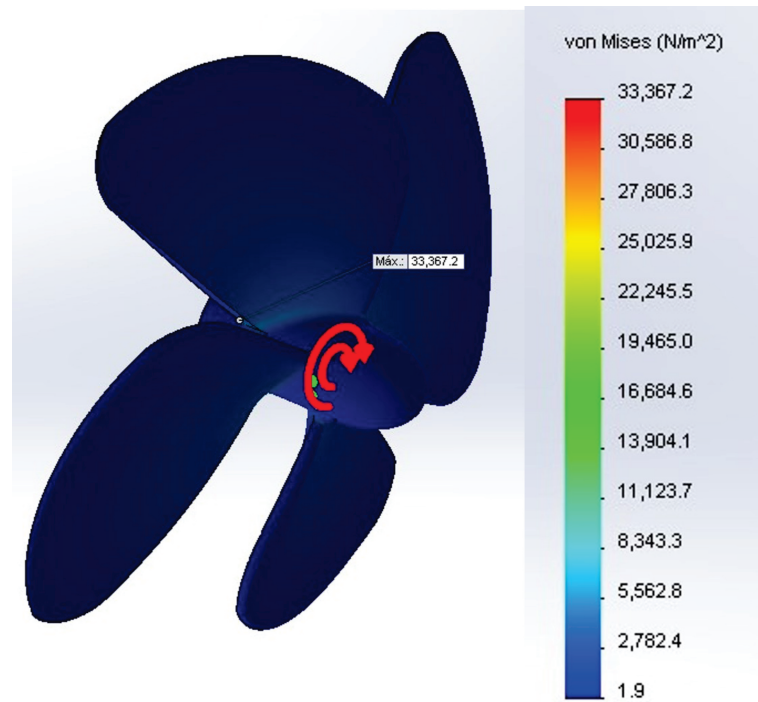


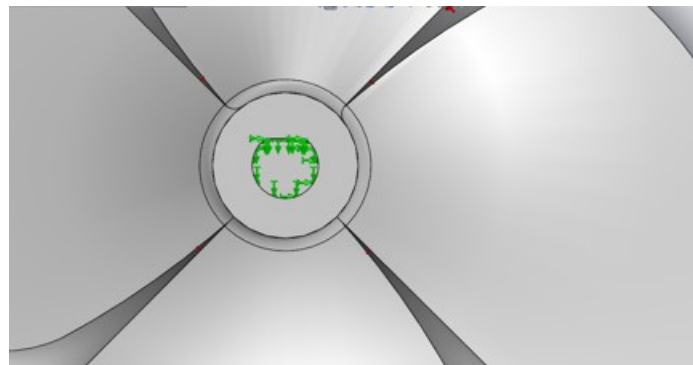
Figura 36: Esta Figura muestra la interacción de fuerzas en la propela. a)Puntos de sujeción de las aspas, b) Las fuerzas a las que se encuentra sometido.

Como resultado de la prueba se detectaron los esfuerzos máximos en la curvatura del aspa (Figura 37a) como era de esperarse.

La pieza fue manufacturada mediante el proceso de impresión 3D, usando PLA. Debido a que en este tipo de proceso de manufactura solo se usan “hilos” de material, la estructura del cuerpo de la propela no es lo suficientemente fuerte, por lo que el par aplicado por la fuerza del agua y la del motor es demasiado y se romperá. La siguiente modificación que se le hará al diseño de la propela es agregar un empaque de metal y



(a)



(b)

Figura 37: Esfuerzos a los que se encuentra sometida la propela. a) Esfuerzos máximos en la curvatura b) concentración de la fuerza en el centro de la propela.

conservar las aspas de PLA, con el propósito de que el empaque de metal absorba el par aplicado.

2.1.3. Lastre

Los prototipos elegidos a desarrollar son el tanque de lastre de pistón y el tanque de lastre a presión, los cuales presentan una inmersión estática.

Los requerimientos para estos tanques son:

- Diámetro del tanque no mayor a 5 cm aproximadamente o 2 pulgadas.
- Longitud no mayor a 36 cm que es la longitud del submarino.
- Diseñado para funcionar hasta 5 m.

Lo más importante a tomar en cuenta es la presión a la que estará sometido el tanque a una profundidad de hasta 5 m, para conocer la presión a esa profundidad se realiza el siguiente cálculo:

$$P = \rho hg + P_0 \quad (20)$$

donde P es la presión a la profundidad establecida, ρ es la densidad del agua (1000 kg/m^3), g es la constante de gravedad (9.81 m/s^2), P_0 es la presión atmosférica al nivel del mar 1 atmosfera es igual a 98 066.5 pascal (en Puebla es de 290 mm Hg o 38 663.496 Pascal). Aplicando la ecuación (20)

$$P = \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (5\text{m}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) + 290\text{mmHg}$$

Realizando las conversiones de unidades necesarias se tiene que la presión a 5m de profundidad es

$$P = 0.88 \text{ Bar}$$

Con esta información es posible escoger los materiales necesarios para cada prototipo a desarrollar.

Prototipo 1 tanque de lastre

El primer prototipo realizado fue el tanque de lastre de pistón, de acuerdo con los criterios anteriores se utilizó el siguiente material para su construcción:

- Tubo de pvc hidráulico de 2 pulgadas para el casco exterior
- Tornillo sin fin de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ pulgada

- Tuerca de acero de 1/2 pulgada
- Material PLA para impresora 3D
- Pegamento para PVC
- Goma para los empaques
- Tornillos de 3/16
- Tuercas de 3/16
- Motorreductor pololu 25D 499:1

Para conocer la cantidad de agua que puede almacenar el tanque, se ha de calcular el volumen del tanque (Ver Figura 38).

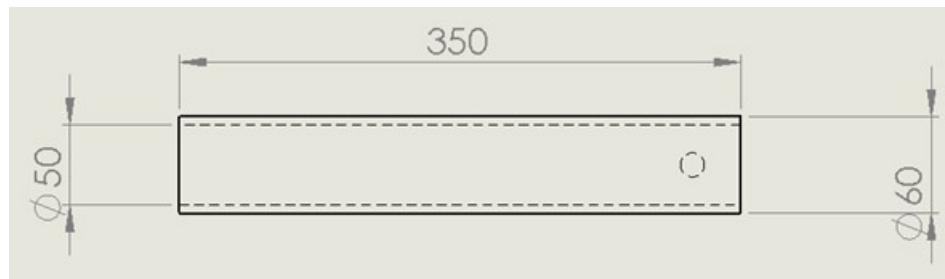


Figura 38: Medidas tanque de agua prototipo 1, las cuales se encuentran en milímetros.

Se calcula mediante la fórmula del volumen del cilindro, donde r es el radio del cilindro y h la altura del mismo.

$$V = \pi * r^2 * h \quad (21)$$

Lo que nos da:

$$V = \pi * (2.5cm)^2 * 35cm \quad (22)$$

Lo que nos da un volumen, al cual también se le debe restar el volumen del tornillo.

$$V = 690cm^3 - 37cm^3 = 653cm^3 \quad (23)$$

Como solo puede ser utilizado el 80 por ciento del tanque de agua, nuestra capacidad será de 522ml.

Para la elección del motor se escogió un motor que produce 22 Kg*cm de torque, ya que al ser un sistema completamente mecánico para el almacenamiento y expulsión de agua del contenedor, y a pesar de ser una profundidad pequeña, se requiere de un motor con

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO

buen torque para poder vencer la presión exterior al momento de expulsar el agua del contenedor (Ver Figura 39).



Figura 39: Motor pololu 25D 499:1.

El tornillo sin fin el cual se encargará de mover el émbolo en un movimiento lineal hacia delante o hacia atrás, y que se encargará de permitir la entrada de agua o expulsión de esta, posee las siguientes dimensiones, ver Figura 40:



Figura 40: Tornillo sin fin prototipo 1, las cuales se encuentran en milímetros.

La estructura interna queda de la siguiente manera (Figura 41):

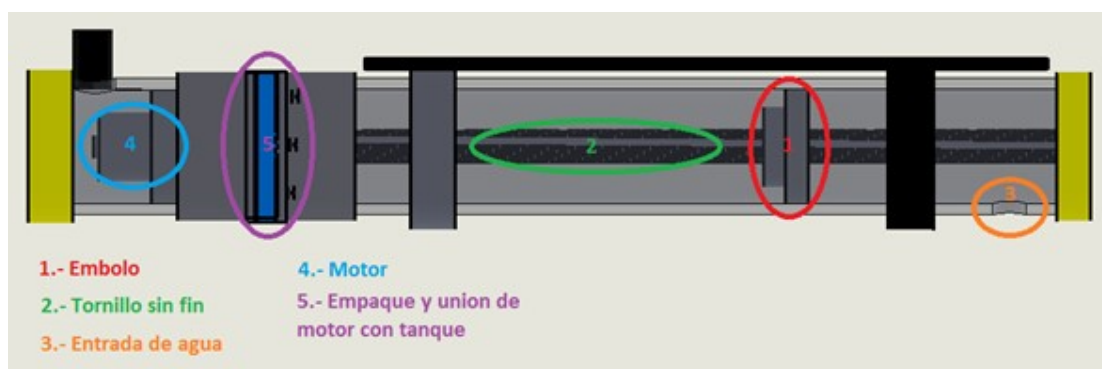
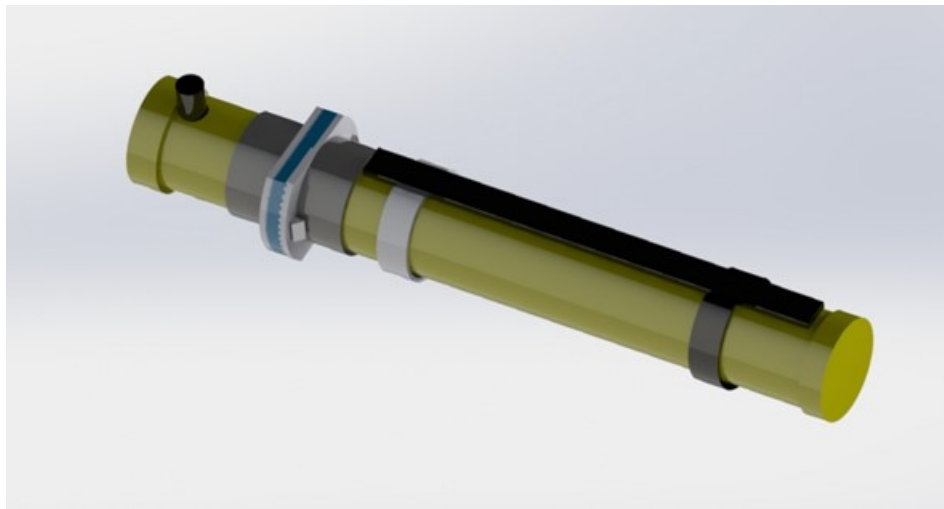


Figura 41: Estructura interna prototipo 1.

Y finalmente el tanque de lastre quedó de la siguiente manera (Figura 42):

Tabla 4: Ventajas y desventajas prototipo 1

Ventajas	Desventajas
Costo relativo bajo se puede usar control para elegir la profundidad a la que se desea estar	El sistema es pesado. Se presenta diversas filtraciones, en el tanque de agua. El consumo del motor, con su torque máximo es de 2.2 A

**Figura 42:** Prototipo 1 final tanque de lastre.*Prototipo 2 tanque de lastre.*

El segundo prototipo realizado fue el tanque de lastre a presión, de acuerdo con los criterios anteriores se utilizó el siguiente material para su construcción:

- Tubo de pvc hidráulico de 2 pulgadas para el casco exterior
- Tubo de acrílico de 1 1/2 pulgada
- Material PLA para impresión 3D
- Pegamento para PVC
- Goma para los empaques
- Bomba de Agua RS-360 Reversible

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO

- Manguera de 4mm de diámetro
- Conector de unión para manguera de 4mm

Para conocer la cantidad de agua que puede almacenar el tanque, se ha de calcular el volumen del tanque(Figura 43).



Figura 43: Medidas de tanque de agua prototipo 2, las cuales se encuentran en milímetros.

Se calcula mediante la fórmula del volumen del cilindro, donde r es el radio del cilindro y h la altura del mismo.

$$V = \pi * r^2 * h \quad (24)$$

Lo que nos da:

$$V = \pi * (2cm)^2 * 35cm \quad (25)$$

Lo que nos da un volumen de:

$$V = 439cm^3 \quad (26)$$

Para la elección de la bomba de agua (Figura 44), se escogió una del tipo reversible con el fin de que esta pueda llenar o pueda vaciar el tanque sin necesidad de más elementos y así tener posibilidad de aumentar el tamaño del tanque de agua si así se desea.



Figura 44: Bomba de agua prototipo 2.

Se usa un tanque de agua interno al interior del casco, ya que la bomba de agua al ser una bomba de engranajes, esta no es sumergible por lo que se intenta lo más posible aislar el tanque para así evitar filtraciones de las mangueras de conexión que lleva la bomba de agua hacia el tanque y hacia la parte exterior (Figura 45).

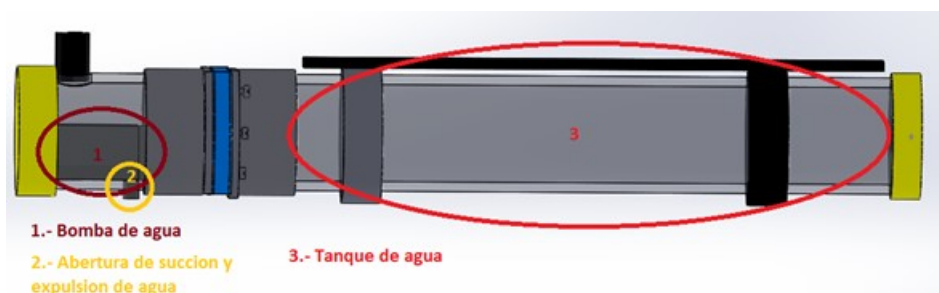


Figura 45: Estructura interna prototipo 2.

Y finalmente el tanque de lastre quedó de la siguiente manera (Figura 46):

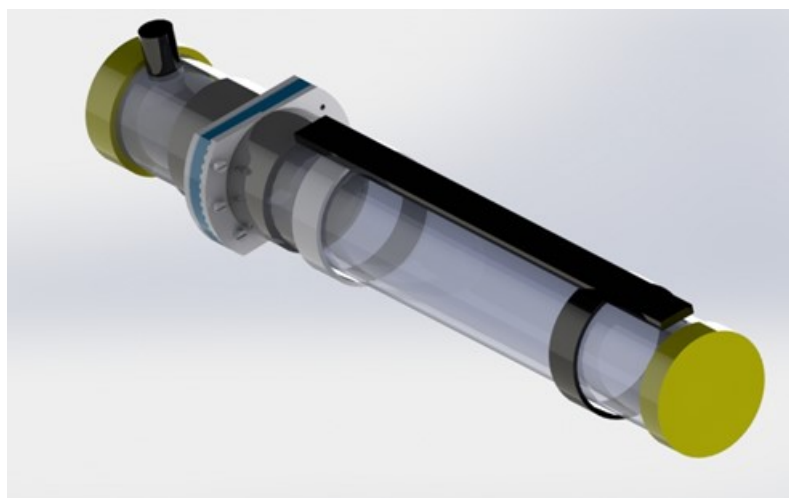


Figura 46: Prototipo 2 tanque de lastre.

Y para finalizar se presenta un renderizado de cómo se verá el tanque de lastre montado en el mini-submarino (Figura 47):

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO

Tabla 5: Ventajas y desventajas prototipo 2

Ventajas	Desventajas
Costo relativamente bajo, Se puede realizar control para elegir la profundidad a la que se desea estar. Solo es necesaria una bomba, para poder realizar el llenado o vaciado del tanque.	Consumo eléctrico, es de 1 A funcionando a máxima velocidad.



Figura 47: Estructura completa del submarino renderizado.

2.1.4. Péndulo de torsión

Como puede verse de las ecuaciones genéricas de un vehículo marino (3), (4), (5), (6), (7), (8) aparecen cantidades que debemos determinar para que el modelo dinámico del sistema esté completo, nos referimos a los momentos de inercia, una manera de deducir estos parámetros es usando un péndulo de torsión.

El péndulo de torsión es un sistema que consiste de un cuerpo rígido suspendido por medio de una cuerda a partir de un soporte físico, en la Figura 48 se muestra un esquema del péndulo de torsión [30].

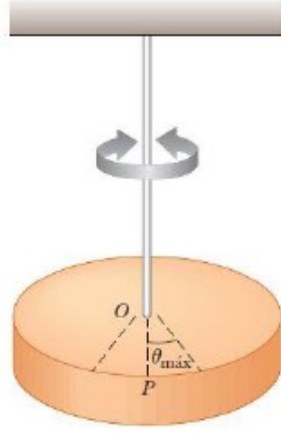


Figura 48: Péndulo de torsión, forma general de este sistema [19].

Cuando los objetos son rotados a un ángulo θ , la cuerda proporciona una par de torsión, τ la cual es proporcional a su posición angular (ley de Hooke), es decir:

$$\tau = -C_u\theta, \quad (27)$$

Donde C_0 es la constante de restitución de la cuerda que se tuerce que depende del material de la cuerda y del número de fibras que consiste la cuerda, θ es el ángulo de torsión de la cuerda. Se sabe que la ley de Euler se escribe para un cuerpo rígido como sigue:

$$\tau = I_{ZZ}\ddot{\theta}, \quad (28)$$

La ecuación (28) representa el par aplicado en el cual I es igual al momento de inercia al rededor del eje de rotación y $\ddot{\theta}$ la aceleración angular. Partiendo de las expresiones (27) y (28) tenemos la siguiente expresión:

$$I_{ZZ}\ddot{\theta} + C_0\theta = 0 \quad (29)$$

La cual es la ecuación típica del movimiento armónico simple.

Partiendo de la ecuación (29) se obtiene para el periodo de oscilación del péndulo de torsión que está dado por la siguiente expresión

$$P = 2\pi\sqrt{\frac{I_{ZZ}}{C_0}} \quad (30)$$

Es gracias a esta ecuación que, conociendo el periodo P y la constante de torsión C_0 , somos capaces de encontrar el momento de inercia I_{ZZ} . En base a este método construimos un péndulo de torsión para medir los momentos de inercia del minisubmarino. Y en el capítulo 3, se muestra como se midió uno de los momentos de inercia del mini submarino 1.

2.2. Prototipo 2

En este apartado se menciona el ensamblaje del casco, la propela y cabe mencionar que para este prototipo no se realizó el tanque de lastre, para el prototipo 2. El cual se desarrolló a partir de ventajas y desventajas, obtenidas al construir y probar el prototipo mencionado en la sección 2.1.

2.2.1. Chasis

Se seleccionaron las características esenciales para la construcción de este prototipo, las cuales proporcionan ventajas para el mismo.

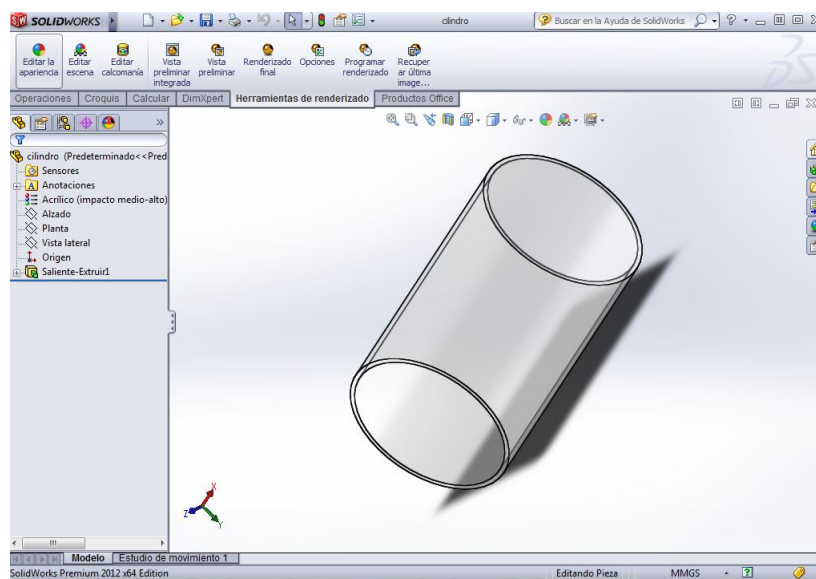
Se realizaron dos tubos (Figura 49a) con un tapón para registro, Figura 49b, el cual facilita abrir y cerrar de manera más sencilla, y así poder manipular el material interno. Estos tubos se diseñaron con el fin de contener la parte electrónica y ayudar a que el prototipo pueda emerger sin necesidad de usar los motores.

Contiene dos placas laterales de acrílico, Figura 49c, usadas para fijar las bases, Figura 50a que sujetan los cilindros y colocar los motores, utiliza una barra de aluminio en la parte inferior, Figura 50b para concentrar el peso y ayudar a la estabilidad del mismo como se menciona en el capítulo 1.

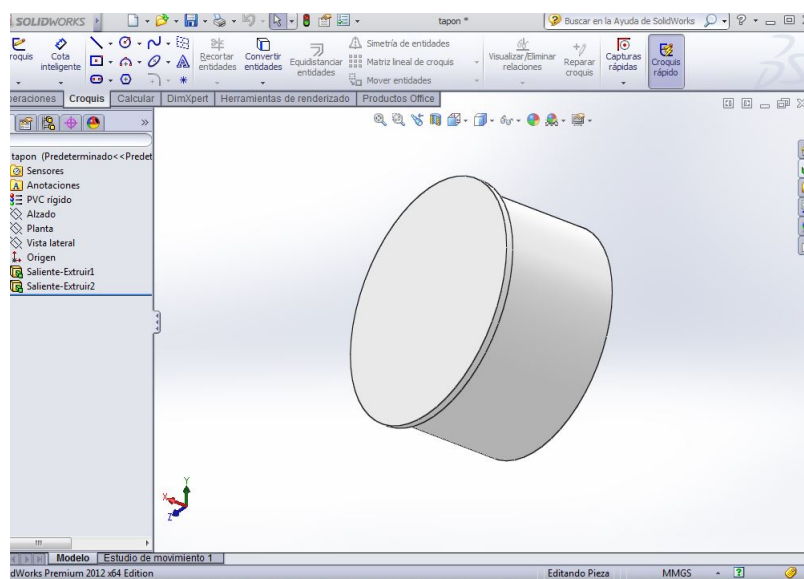
En los extremos de los cilindros se colocaron tapones de registro de 4 pulgadas, Figura 49b, con tapa roscada de aluminio, el cual facilita abrir y cerrar de manera más sencilla, así poder manipular el material interno. Estos tubos se diseñaron con el fin de contener la parte electrónica y ayudar a que el prototipo pueda emerger sin necesidad de usar los motores.

Una vez de haber realizado lo anterior con el fin de hacer estable el casco, se implementaron dos placas laterales de acrílico, en las cuales fueron colocadas seis bases. Estas se fabricaron en impresión 3D con material del tipo PLA (Poliácido láctico), con el fin de tener un soporte para el cilindro. 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. Esta estructura (Figura 51) puede ser adaptada en función al material interno

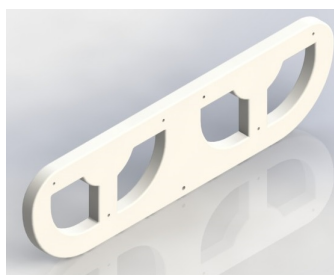
2.2 Prototipo 2



(a)



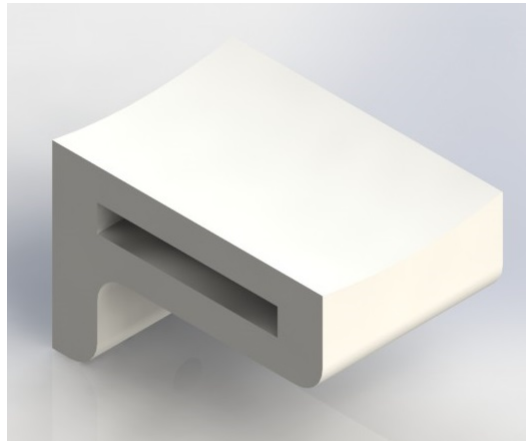
(b)



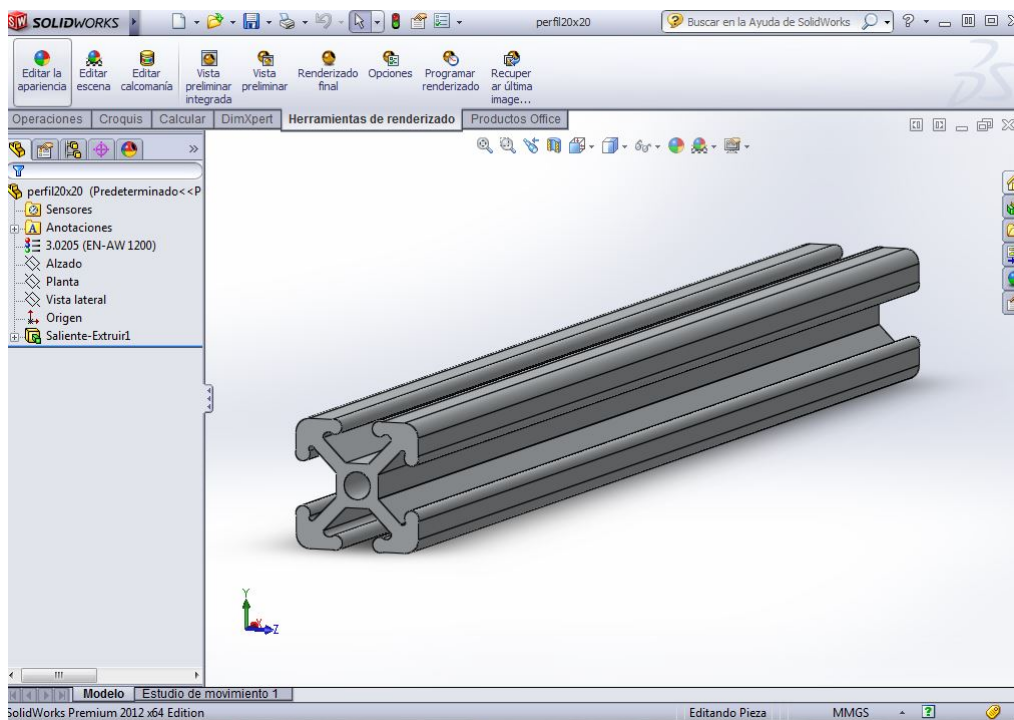
(c)

Figura 49: Diseño del prototipo 2. a) cilindro para intruducir la parte electronica, b) tapon, c) placas laterales.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO



(a)



(b)

Figura 50: Diseño del prototipo 2. a) bases para fijar los cilindros, b) barra para conectar el peso en la parte inferior del prototipo

Tabla 6: Desempeño del motor [31]

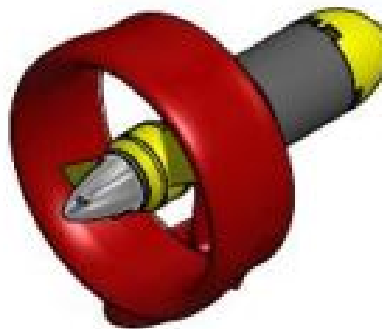
Marcha atrás	
Corriente con carga [A]	Carga [Kg]
1	0.45
5	1.3
19	2.9

requerido y al tamaño de los motores.

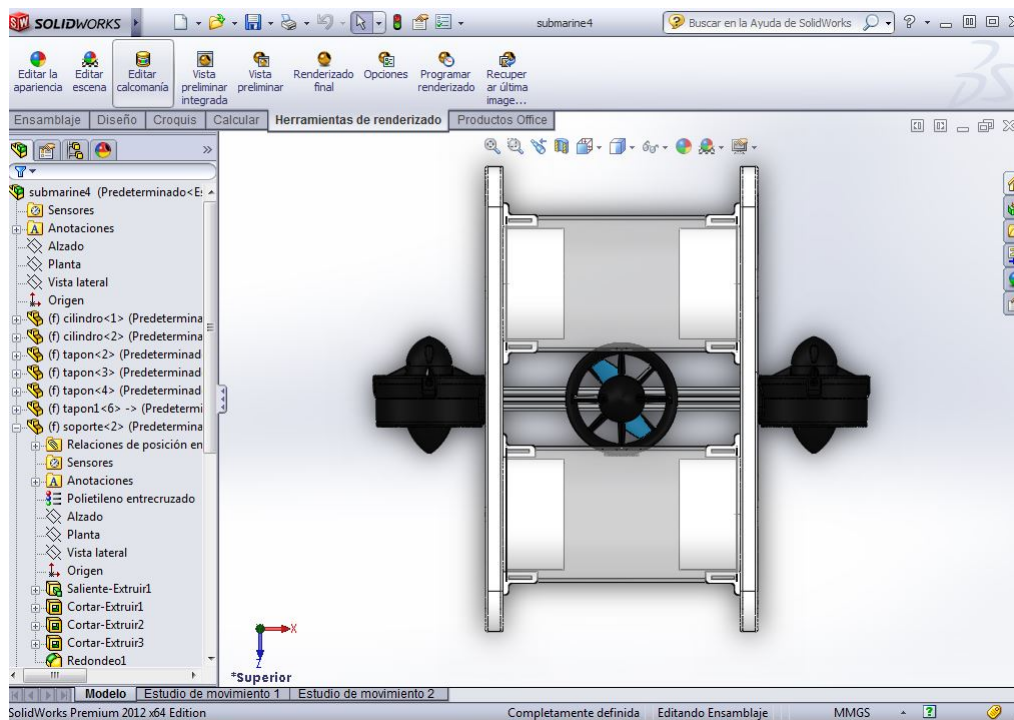
2.2.2. Propelas

En esta sección se describe el diseño y la construcción de las propelas que usa el prototipo del mini submarino. Para la construcción de la propela fue necesario revisar ciertos parámetros que se mencionaron detalladamente en el capítulo 1.

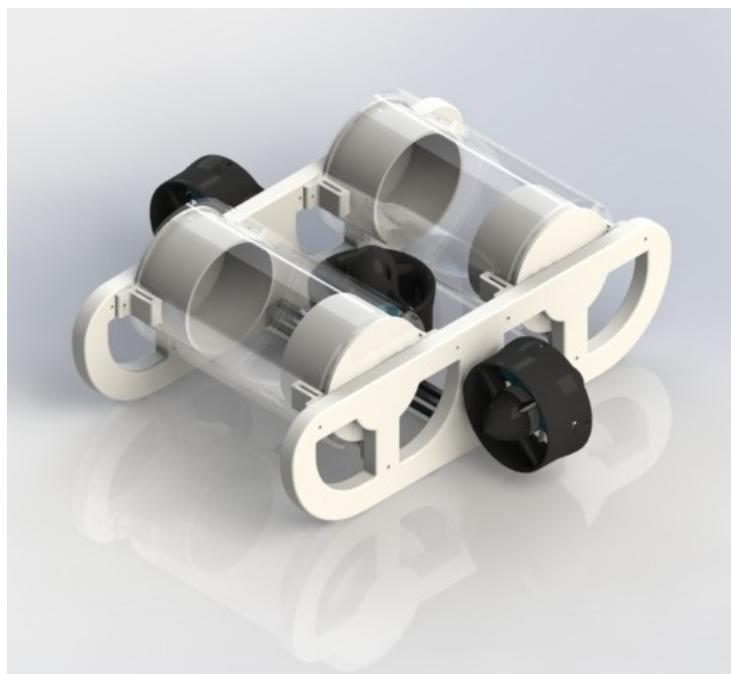
Las propelas, son un elemento formado por una serie de dispositivos que se denominan aspas o álabes, dispuestos de forma concéntrica sobre un eje y que giran alrededor de éste en un mismo plano. Gracias a sus aspas pueden transmitir su energía cinética, creada al girar los álabes, a un fluido líquido o gas de manera que se crea una fuerza de tracción o empuje a lo largo del eje de rotación. El diseño presentado se basó en otro trabajo [31](Figura 52), las cuales, presentan una gran eficiencia en el agua, como se muestra en las Tablas 2 y 3.

**Figura 52:** Propela del mini submarino [31].

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO



(a)



(b)

Figura 51: Estructura externa del mini submarino. a) Vista superior, b) Vista isométrica.

Tabla 7: Desempeño del motor [31]

Marcha Adelante	
Corriente con carga [A]	Carga [Kg]
1	0.5
5	1.5
10	2.3

2.2.3. Ensamble mecánico (chasis, propelas, etc.)

Esta sección describe el ensamblaje del chasis como se muestra en la Figura 53a. El material de construcción del casco del prototipo, en forma de cilindro, es de acrílico de 3mm de espesor, Figura 53a, con tapones de 4" de PVC con aluminio, Figura 53b.

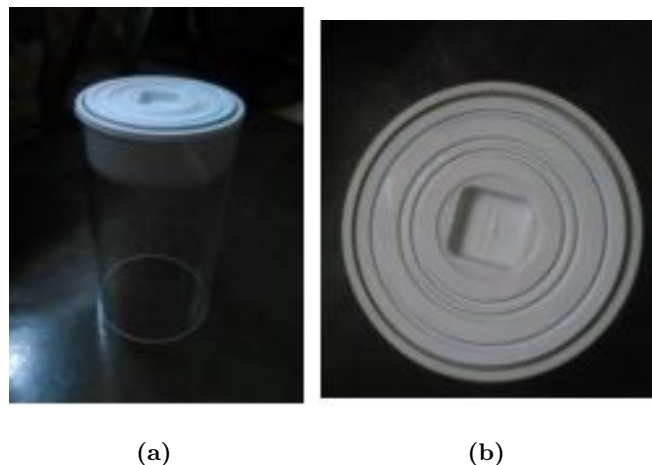
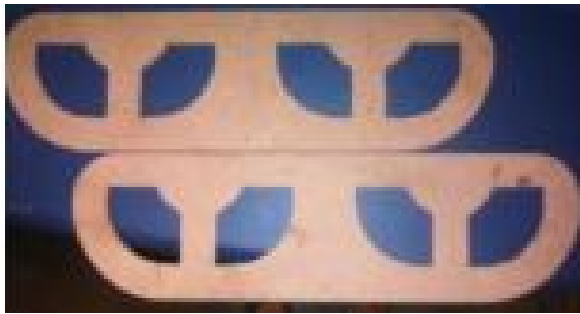


Figura 53: a) cilindro de acrílico, b) Tapón de registro de 4".

Se realizaron dos placas laterales de acrílico, Figura 54a y algunas piezas en impresión 3D, las cuales forman parte del soporte para los cilindros, Figura 54b.

En la Figura 55 se muestra el diseño de la propelas, el cual cuenta con una base para sujetarse en el prototipo sin presentar deficiencias por la filtración de agua. Se construyeron en impresión 3D con PLA.

La Figura 56 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,



(a)



(b)

Figura 54: a) Placas laterales, b) soporte para cilindros



(a)



(b)

Figura 55: a) Propelas y tobera, b) Aspaspas o alabes

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.



(a)



(b)

Figura 56: Prototipo 2. a) Version 1, b) Version final

2.2.4. Ensamble electrónico

Un motor brushless o motor “sin escobillas” 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 [33]. En este trabajo, se reporta la caracterización de los motores, como se muestra en la Tabla 8, los cuales son brushless del tipo outrunner.

En la Tabla 9 se muestran las especificaciones del ESC (por sus siglas en inglés, Electronic Speed Controller) utilizado, el cual, es programable y funciona mediante PWM.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO

Tabla 8: Especificaciones de Motores brushless [32]

RPM/V	750kV	Potencia máxima	265 W
Voltaje Máximo	15 V	Resistencia	0 Ω
Corriente Máxima	18 A	Masa	87 g

Tabla 9: Características del Motor Brussless[33]

Corriente constante	30 A	Corriente máxima	40 A
		Configuraciones Programables:	
		Tipo de batería	
Voltaje Máximo	15 V	Aceleración	
		Rotación	
		Modo de operación	
Tipo de Motor	Sensorless brushless		
Masa	53kg		

El montaje de este experimento se muestra en la Figura 57 y consiste en:

- Programar el ESC para que el motor opere hacia adelante y reversa con una aceleración del 100 por ciento.
- programando arduino para generar una señal cuadrada de periodo T hasta que el ESC se inicialice.
- Comprobar que los motores sean capaces de funcionar bajo el agua.



Figura 57: Montaje de pruebas, para mini-submarino.

Una de las condiciones para que el ESC se inicialice es enviar de la tarjeta arduino (el código general usado para la caracterización de los motores se encuentra en el apéndice 2) 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 $1100\mu s$ y $1900\mu s$. 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 $1500\mu s$.

En el rango de $1100-1500\mu s$ el motor gira en reversa (o atrás) mientras que en el rango de $1500-1900\mu s$ el motor gire hacia adelante.

A continuación se muestra en la tabla los datos generados por el motor usando una base pendular para medir la corriente con carga y sin carga en el motor, el cual se muestra en la Figura 58:

La base consta de un péndulo, 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, jalara la balanza a un cierto punto. De esta forma se obtuvieron los resultados presentados en las Tablas 10, 11 y 12.

Estas graficas se obtubieron en el programa matematica,de las cuales podemos observar, que el comportamiento del motor derecho y centro es muy similares en siertos puntos, sin embargo a mayores corrientes el comportamiento de los motores tiene una

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO



(a)

Figura 58: Base Pendular, vista vertical

Tabla 10: Motor Izquierdo

Pulso (us)	Carga (Kg)	corriente Amperes
1100	0.5	3.69
1288	0.1	1.62
1619	0.25	4.27
1682	0.5	7.32
1750	0.75	9.01
1800	1.25	14.01
1900	2	20

Tabla 11: Motor Derecho

Pulso (us)	Carga (Kg)	corriente Amperes
1100	0.5	3.87
1288	0.15	1.33
1619	0. 5	5.04
1682	0.75	8.73
1750	1	13.1
1800	1.5	18.41
1900	2.2	22

Tabla 12: Motor Centro

Pulso (us)	Carga (Kg)	corriente Amperes
1100	0.5	3.82
1288	0.25	2.01
1619	0.25	3.90
1682	0.5	7.02
1750	0.75	9.40
1800	1	13.01
1900	2.1	21

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MINI-SUBMARINO

mayor discrepancia.

De los resultados obtenidos se realizaron las gráficas corriente-carga (kg) y ancho de pulso-corriente (A), ver figura 59, en las cuales podemos observar que a mayor corriente, mayor carga y viceversa. En las gráficas de ancho de pulso podemos ver que al incrementar el pulso, el cual influye en el aumento de velocidad del motor, genera una mayor demanda de corriente.

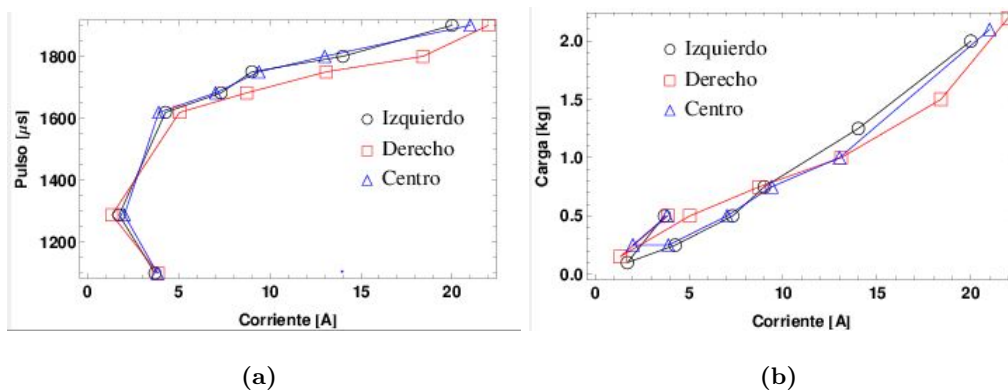


Figura 59: Resultados obtenidos de los motores con su propela

Es importante mencionar que aunque los motores son del mismo tipo y marca, al realizar esta caracterización podemos ver un comportamiento diferente para cada motor (ver figura 59 y 60), es por ello, que se necesita aplicar un control para poder hacer que dos motores vayan a la misma velocidad.

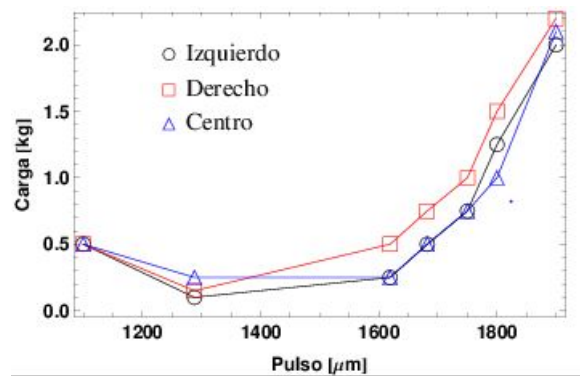


Figura 60: Resultados obtenidos de los motores con su propela

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron en el diseño y construcción del prototipo 2. En la primera sección se realizó un estudio para caracterizar los momentos de inercia del mini-submarino 1. En la sección dos se describe que no se encontraron filtraciones que dañaran los dispositivos electrónicos, también en esta sección se presentan las pruebas de estabilidad del prototipo que muestran que el centro de gravedad está alineado con el centro de flotabilidad. Posteriormente se realizaron las pruebas de navegación, en las cuales se presentan dos, una con el material afuera y otra con todos los componentes en la parte interior del prototipo, navegando en la superficie y sumergido. Finalmente se presentan los resultados de exploración, en los cuales describimos la toma de datos con el sensor y la comparación entre los datos obtenidos por nuestro sensor MS5837-30BA y una computadora D4 sumergible.

3.1. Medición experimental de un momento de inercia

Con el proposito de obtener las características del mini-submarino se construyo un pendulo de torsión, ver Figura 61, el cual nos permite determinar el momento de inercia de un cuerpo solido o rígido a lo largo del eje vertical, por medio de la siguiente expresión.

$$p = (2\pi)\sqrt{\frac{I_z + I_f}{C}} \quad (31)$$

Donde es P el periodo de oscilación, I_z es el momento de inercia a medir, I_f es el momento de Inercia del marco y C es la constante de torsión de los alambres. Se implementó este instrumento de medición capaz de medir momentos de inercia de objetos con forma irregular.

3. RESULTADOS

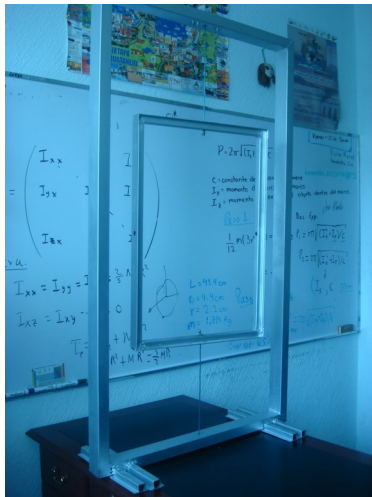


Figura 61: Tensor de Inercia.

Como se puede observar en la ecuación (31), para que esta sea útil se requiere determinar el momento de inercia del marco I_f y la constante de torsión del cable C . Para esto seguimos el siguiente procedimiento.

Utilizando un cilindro homogéneo de aluminio del cual se conocen sus características geométricas y su masa, por medio de las formulas teoricas que aparecen en cualquier libro de mecanica los momentos de inercia de este cilindro se pueden determinar como sigue, donde m es la masa de 1.714 kg, R el radio de 2.2 cm y L el largo 41.4 cm:

$$I_z = I_y = (2\pi) \frac{1}{12} m (3R^2 + L^2) = 0.0251957 \text{ kgm}^2 \quad (32)$$

$$I_x = \frac{1}{2} m R^2 = 0.0004114 \text{ kgm}^2 \quad (33)$$

Estos valores les llamamos los momentos de inercia teoricos del cilindro. Ahora nos proponemos determinar los momentos de inercia del cilindro de manera experimental, colocando al cilindro en dos configuraciones, como se muestran en la Figura 62, se midió el periodo, para estas dos posturas, $P_1 = 3.51 \text{ seg}$ y $P_2 = 3.67 \text{ seg}$.

Ahora usando la ecuación (31) para P_1 y P_2 junto con los valores de los momentos de inercia I_x e I_z se obtienen un par de ecuaciones con dos incognitas, resolviendo estas se obtienen:

$$I_F = 0.265386 \text{ kgm}^3 \quad (34)$$

$$C = 0.85171 \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} \quad (35)$$

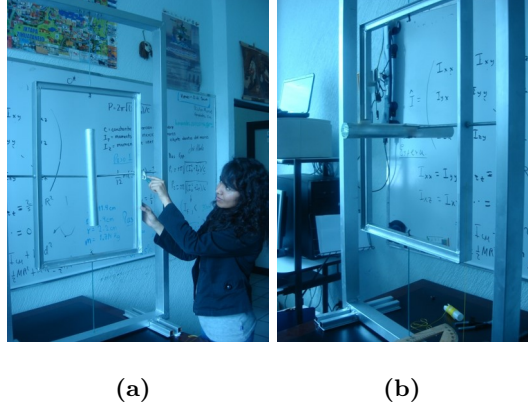


Figura 62: Colocación del cilindro, (a) Vertical, (b) Horizontal.

Para calibrar nuestro aparato de medición, se determino el momento de inercia para una pelota de basketball, (Figura 63), de manera teorica y experimental para comprobar si ambos resultados nos dan lo mismo.

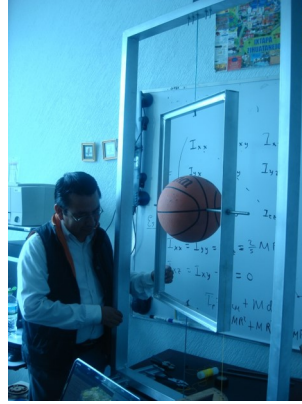


Figura 63: Calculando el periodo para el momento de inersia de una pelota de basketball.

Usando la definición de momento de inercia obtenemos que para una pelota hueca se tiene que V_a es el volumen del aire, V_p es el volumen de la pelota, M_a es la masa del aire de 6 gramos, M_p masa de la pelota de 584 gramos, R_1^5 es el radio interior de 11.1766 cm y R_2^5 es el radio exterior de 12.0160 cm :

$$I_{PT} = \frac{8\pi}{3} \left[\left(\frac{M_a}{V_a} - \frac{M_p}{V_p} \right) \frac{R_1^5}{5} + \frac{M_p}{V_p} \frac{R_2^5}{5} \right] = 0.00869 \text{ kgm}^2 \quad (36)$$

3. RESULTADOS

En la ecuación anterior se han medido las cantidades de dicha expresión y se obtuvo el valor numérico que se indica, este lo llamamos momento de inercia de la pelota teórica.

Por otro lado, midiendo el periodo en el péndulo de torsión, para la pelota obtenemos $P = 3.56 \text{ seg}$. empleando la ecuación (31), tenemos:

$$I_{pe} = 0.00803 \text{ kgm}^2 \quad (37)$$

Así entonces podemos comparar el resultado de la expresión 36 y 37, los cuales demuestran que los datos teóricos (36) y experimentales (37) coinciden dentro del error experimental, por lo tanto, los datos determinados del momento de inercia del marco I_f y la constante de torsión del sistema C , se encuentran bien.

Finalmente, se determinó con este aparato el momento de inercia del prototipo 1. En la Figura 64 se muestra como se colocó el prototipo y se determinó su momento de inercia a lo largo del eje vertical, se encontró que el periodo de oscilación fue $P = 4.43 \text{ seg}$, con el cual al emplear la ecuación (31) se obtiene:

$$I = 0.158 \text{ kgm}^2 \quad (38)$$

Sin embargo no se obtuvieron los momentos de inercia para otros ejes del prototipo 1, ni se midieron los momentos para el prototipo 2, debido a que no había forma de fijar los prototipos en el tensor de inercia en otras posiciones.

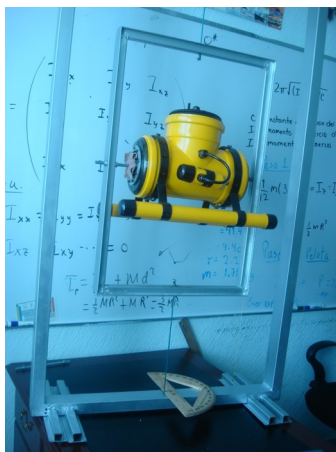


Figura 64: Prototipo 1 colocado en el tensor de inercia.

3.2. Pruebas de inmersión

En la actualidad existen dos maneras diferentes de sumergir un submarino, de manera estática y de manera dinámica. Varios modelos de submarinos y de mini submarinos 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. La Figura 65 presenta la estabilidad del submarino así como la flotabilidad que se genera debido a el aire concentrado en sus cilindros. En la Figura 66 se muestra el mini-submarino bajo el agua usando un motor (inmersión dinamica) y tambien que no es necesario tener prendido el motor para que el submarino pueda salir a la superficie debido a la acumulacion de aire en los contenedores (cilindros).



Figura 65: Estabilidad del prototipo.

Se logro una estabilidad en el prototipo 1, ya que tiene un diseño simetrico y concentramos el peso en la parte inferior, para obtener estabilidad, como se menciona en el capitulo 1.

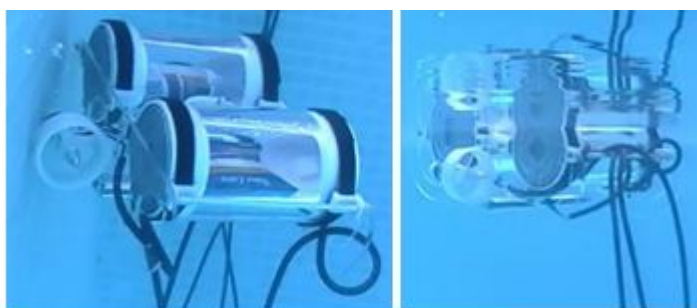


Figura 66: Prototipo en funcionamiento.

Las pruebas realizadas al sumergir el prototipo hasta 5 metros de profundidad, fueron satisfactorias ya que no existieron filtraciones, debido a que sellamos el prototipo usando silicon automotriz al colocar las gladulas por donde salen los cables y usando un oring en las tapas al cerrarlas.

3.3. Pruebas de navegación

En esta sección se describe las distintas pruebas de navegación que se realizaron, las cuales se llevaron a cabo en la alberca de clavados de ciudad universitaria, (BUAP), la cual presenta las siguientes características, 5 metros de profundidad, y 10 metros por cada lado de la alberca.

Las primeras pruebas de navegación fueron realizadas, con todo el mecanismo electrónico afuera, y simulando el peso de los componentes, con dos bolsas de arroz en cada contenedor, como se muestra en la Figura 67. Se observó que el prototipo se mueve de arriba abajo, debido a las corrientes generadas por el movimiento de los motores, las cuales chocan con las paredes de la alberca y rebotan. Se logró que el prototipo se sumergiera sin mayor problema, sin embargo no era posible situarlo en una cierta posición, ya que en nuestro trabajo no aplicamos ningún tipo de control.



Figura 67: Montaje de primeras pruebas.

Las siguientes pruebas fueron realizadas, incluyendo en el interior del prototipo todos los componentes, repartiendo el peso para no provocar inestabilidad en el mismo. Se utilizó un módulo de bluetooth (HC-06) para hacer la comunicación con el prototipo, sin embargo el modulo receptor se colocó en la parte de la superficie del agua, usando una tabla salvavidas, (ver Figura 68). Ya que la comunicación inalámbrica en el agua, no se pudo lograr por la pérdida de señal.

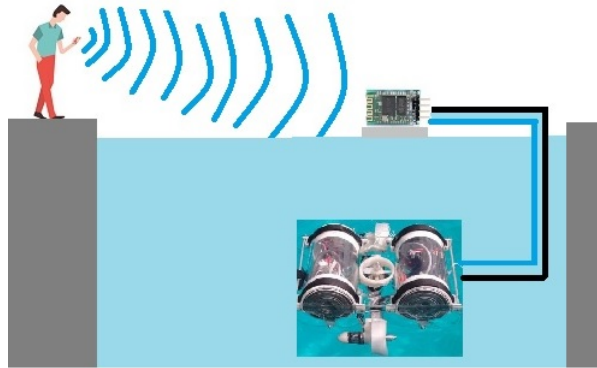


Figura 68: Montaje de la segunda fase de pruebas.

Se utilizó una aplicación para poder hacer la comunicación por bluetooth (Electrónica Bluetooth), usando un teléfono, en la cual se realizó un ambiente para poder controlar los tres motores en dicha aplicación, usando un joystick (palanca de mano), para el control de los motores laterales (motores de avance) y una barra deslizadora para el control del motor central (motor para sumergir). También se ocuparon dos leds para poder verificar que el sensor y la tarjeta de memoria (SD) no presentaran ningún problema de conexión (encendido rojo, mala conexión y verde no presentan ningún problema), como se muestra en la Figura 69. El código que incluye la programación de dicha aplicación, con el funcionamiento del prototipo se presenta en el apéndice 1, sección B.

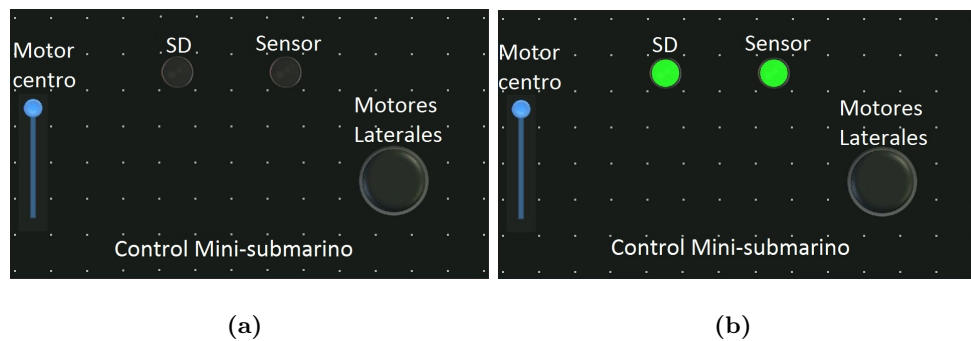


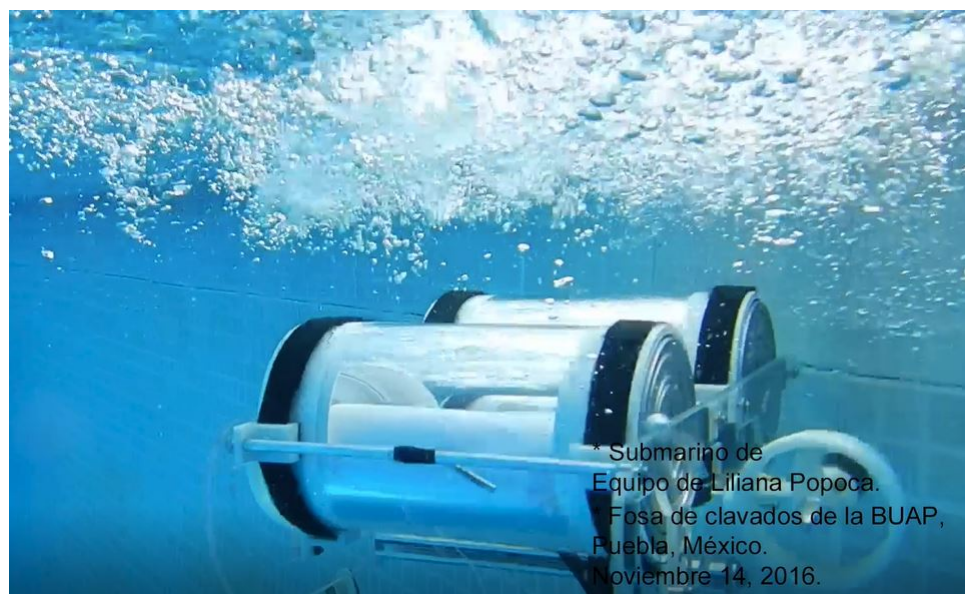
Figura 69: Ejemplo del ambiente propuesto por la aplicación. a) Aplicación apagada, b) Aplicación inicializada correctamente.

Se observó que a mayor de 10 metros y sumergiendo el prototipo a más de 4 metros de profundidad, la señal del bluetooth se pierde, sin embargo con el prototipo en funcionamiento a nivel superficie, el avance puede alcanzar poco más de 10 metros sin problemas, (Figura 70).

3. RESULTADOS



(a)



(b)

Figura 70: Prototipo 2 en funcionamiento, a) en forma de avance e b) inmersión.

3.4. Pruebas de exploración

En esta sección mostramos los resultados obtenidos en la Tabla 13 con los sensores MS5837-30BA y D4, para los cuales se realizaron nueve pruebas variando la velocidad.

Las principales características del sensor MS5837-30BA son:

- Paquete de cerámica - metal, 3.3 x 3.3 x 2.75mm
- Módulo de alta resolución 0.2 mbar
- Conversión rápida hasta 0,5 ms
- Baja potencia, 0,6 μA (espera) 0,1 μA a 25 ° C)
- Sensor de presión digital integrado (24 bit $\Sigma\Delta$ ADC)
- Tensión de alimentación 1,5 a 3,6 V
- Rango de funcionamiento: 0 a 30 bar, -20 a +85 ° C
- Interfaz I2C
- No hay componentes externos (oscilador interno)
- Excelente estabilidad a largo plazo
- Herméticamente sellable

La computadora de buceo (suunto D4) contiene ciertas características, las que consideramos más relevantes son las siguientes :

- Material del bisel: Acero inoxidable
- Material de la lente: Cristal mineral
- Material de la carcasa: Compuesto
- Material de la correa: Silicona
- Peso: 92 g / 3,25 oz
- Sumergibilidad: 100 m (ISO 6425, EN 13319)
- Resolución de temperatura 1°C
- Duración de la pila: 100 inmersiones/año 1,5 años
- Tipo de pila CR 2450

3. RESULTADOS

Tabla 13: Resultados Experimentales del MS5837-30BA y D4

Profundidad H(m)		Temperatura T(°c)			Presión P(mbar)	
D4	MS5837-30BA	D4	MS5837-30BA sin redondeo	MS5837-30BA con redondeo	Teóricos ($\rho g H$)	MS5837-30BA
1.3	1.3	23	22.7	23	127.3	313.9
1.4	1.4	24	22.7	23	137.9	284.5
2.6	2.6	22	23.4	23	254.3	254.9
2.6	2.6	23	23.4	23	255.2	274.5
2.8	2.8	24	23.5	23	274.4	137.3
2.9	2.9	24	23.5	23	283.9	480.5
3.2	3.2	24	23.6	24	313.2	343.3
3.5	3.5	23	23.7	24	342.4	127.5
4.9	4.9	24	24.5	24	479.3	254.9

Se realizaron las pruebas colocando la computadora D4 en la parte delantera, como se muestra en la Figura 71, y el sensor se ubicó en la parte inferior del prototipo, sobre el soporte del motor. Se tomaron nueve lecturas a diferentes profundidades, como se muestra en la Tabla 13:

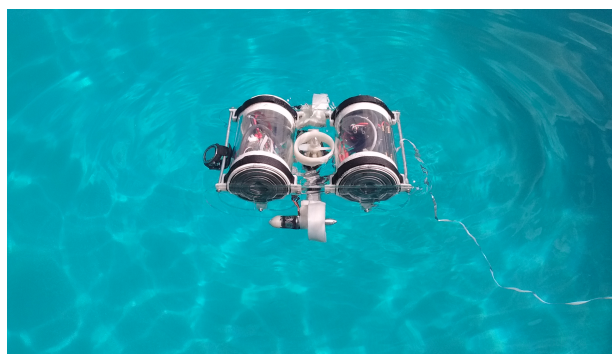


Figura 71: Pruebas colocando los dos tipos de sensores, (D4 y MS5837-30BA).

Los datos obtenidos fueron graficados (Figura 72, 73 y 74), para ver la respuesta de los sensores incluidos en la computadora D4 y el sensor MS5837-30BA.

Los resultados obtenidos por el sensor MS5837-30BA, fueron satisfactorios al tomar la temperatura, la cual, si se realizara la medición en un ambiente natural, como un lago o laguna, la temperatura a mayor profundidad sería menor. Sin embargo nuestras pruebas fueron realizadas en la alberca de clavados de ciudad universitaria (BUAP), la cual tiene un a profundidad de 5 metros y contiene calentadores. Los desagües de agua caliente a la alberca se encuentran en la parte inferior y media, por esta razón son los resultados de nuestra medición y de la medición de la computadora D4, lo cuales se muestran en el gráfico de la Figura 72 y 73.

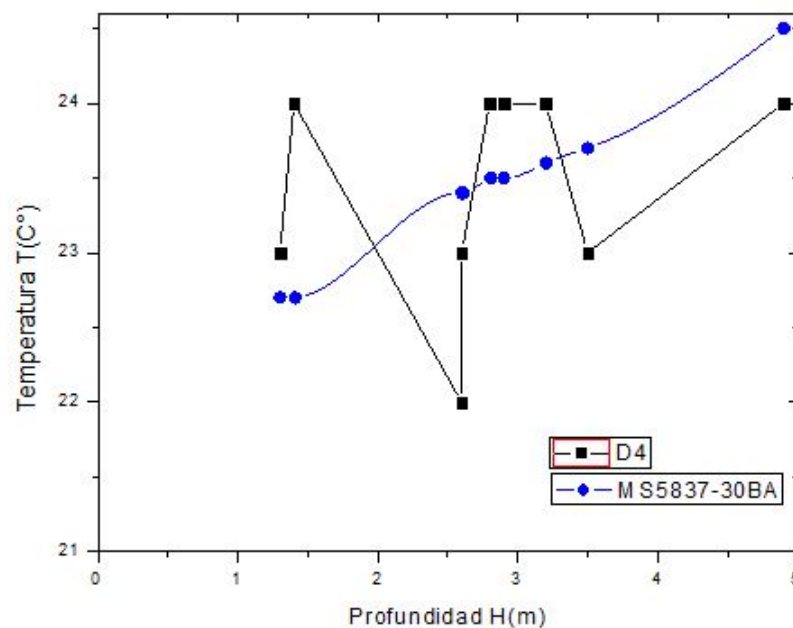


Figura 72: Grafica: Temperatura-Profundidad.

Se aplicó un redondeo en los datos de temperatura para realizar la comparación de datos, experimentales del sensor MS5837-30BA con redondeo, sin redondeo y los obtenidos con la computadora D4, de la cual no sabemos con exactitud a partir de que variaciones de voltaje toma su redondeo como inferior o superior, por eso en algunos casos, como se puede observar hay coincidencias y en otros no, (Figura 73).

3. RESULTADOS

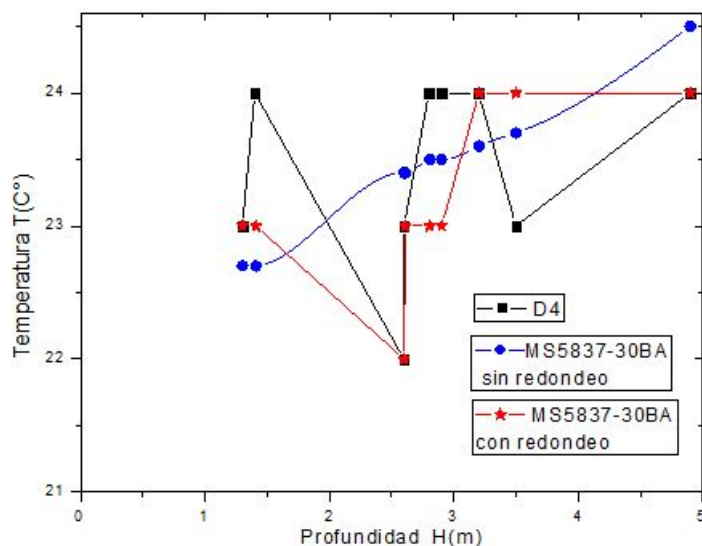


Figura 73: Grafica: Temperatura-Profundidad.

Los datos que podemos observar en la Figura 74, son los resultados generados por el sensor MS5837-30BA al medir presión y profundidad, también agregamos los datos obtenidos al calcular la presión, de forma teórica, usando los datos de profundidad experimentales, finalmente se hace la comparación de datos teóricos y experimentales de la presión-profundidad los cuales muestran un comportamiento total mente distinto, esto lo atribuimos a que el lugar donde se colocó el sensor (parte inferior), como se mencionó anteriormente, era afectado por la presión que se ejercía al ir sumergiendo el prototipo, ya que generaba una fuerza en contra, esto se debe a que no se pudo posicionar el prototipo, porque para este trabajo no se realizó ningún tipo de control, por las dificultades y el equipo requerido. Sin embargo aunque se modificara la postura del sensor, seguiría influyendo las olas generadas por los motores en funcionamiento, ya que hay revote en las paredes de la alberca.

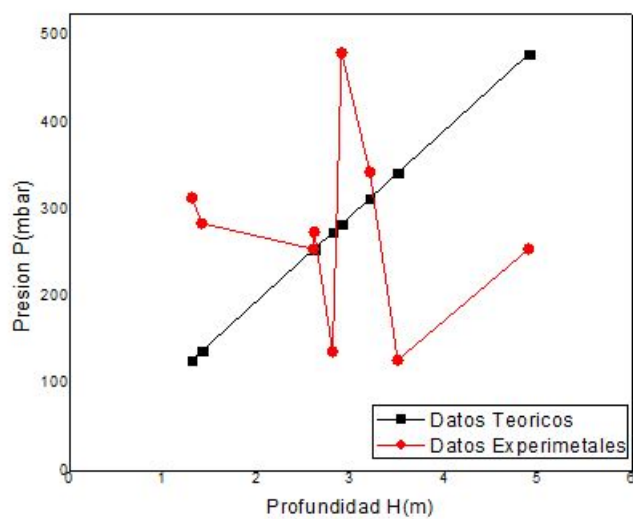


Figura 74: Grafica: Presión-Profundidad.

Conclusiones

Se diseñaron y construyeron dos prototipos minisubmarinos, el primero con una configuración de dos motores, el cual fue desechado debido a que no paso las pruebas de inmersión. No obstante el eje movil que soborta a los dos motores se logro sellar eficientemente. Mientras que el segundo prototipo con una configuración de tres motores logro pasar las pruebas de inmersión, navegación y exploración.

En la parte electronica fue importante la caracterización de los motores, para obtener el empuje, con respecto a la corriente requerida y al ancho de pulso, usando una base pendular.

Se implemento una estrategia de comunicación para guiar al minisubmarino usando una plataforma a manera de boya donde se instalo la antena receptora, la cual es capaz de comunicarse por via bluetooth para la navegación del prototipo, con esta estrategia se evita que el minisubmarino pierda estabilidad, tambien que genere más peso requiriendo usar un motor para emerger y que se enrolle el cable con el prototipo.

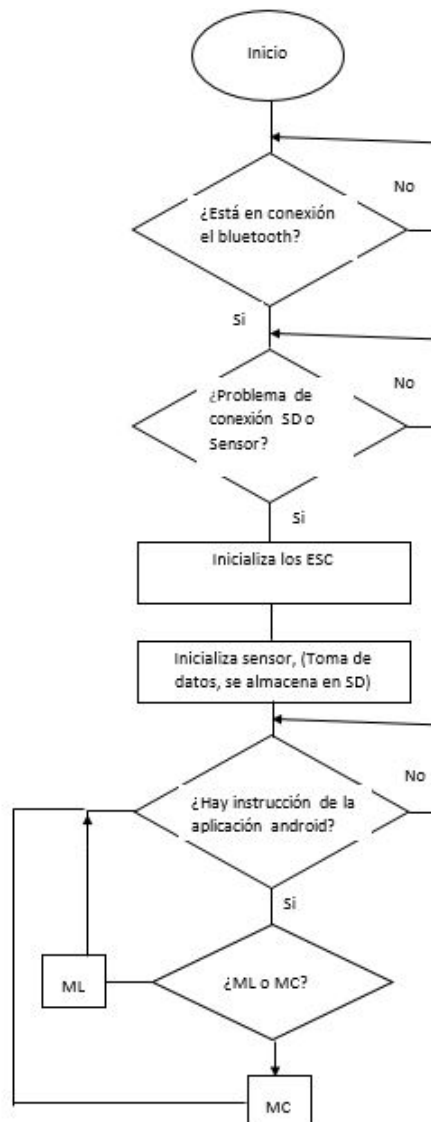
Las pruebas de exploración fueron validadas por medio de un sensor de buceo (suunto D4), las mediciones de la profundidad coinciden con las de nuestro sensor (MS5837-30BA), mientras que las mediciones de temperatura tambien son consistentes entre ambos sensores. Debido a que no tenemos un sensor que valide las mediciones de presión, el comportamiento asaroso de nuestras mediciones lo atribuimos a las corrientes provocadas por las propelas que influyen en las mediciones.

Como trabajo a futuro se planea realizar una ley control para posicionar el minisubmarino a cierta profundidad.

Diagrama de flujo y Códigos

En este apéndice primero se muestra el diagrama de flujo para guiar al mini submarino y la exploración para la medición de temperatura. En seguida mostramos el código que empleamos para la caracterización de los motores. Finalmente mostramos el código general del sistema para guiar del minisubmarino y la manera de explorar y tomar medidas.

A.1. Diagrama de flujo para guía y exploración del mini-submarino



A.2. Código para la caracterización del motor

```
/*Servo tester*/
#include <Servo.h>
#define Throttle A0 //Señal del potenciómetro
// Crea el objeto motor
Servo Motor;

int val=0;    // Variable para leer el valor de xJ
int xthrottle=0;

//Esc pin
int Esc_motor = 5; //Motor Izquierdo

//Min, max & medium pulse
int minPulseRate = 1100; //Pulso mínimo
int maxPulseRate = 1900; //Pulso Maximo
int medPulseRate = 1500; //Pulso medio

void setup(){
  Serial.begin(9600); //Inicia la comunicación serial a 9600 b/s
  while (!Serial);
  Motor.attach(Esc_motor, minPulseRate, maxPulseRate);
}

void loop(){
  val=analogRead(Throttle);
  val=normalizeThrottle(val); // Asegura que el valor esté entre 0 y 100, donde 0 y 100 son e
  //xthrottle=map(val,0,1000,medPulseRate,maxPulseRate); //Decomentar esta linea y comentar
  xthrottle=map(val,0,1000,minPulseRate,medPulseRate); //Descomentar esta linea y comentar l
  Serial.println(xthrottle);
  Motor.writeMicroseconds(xthrottle);
}

// Asegura que el valor esté entre 0 y 100
int normalizeThrottle(int value) {
  if(value < 22) { // Si el potenciómetro no llega a cero, ajustar aquí.
    return 0;
  }
  else if(value > 1000) {
    return 1000;
  }
  else
    return value;
}
```

A.3. Código General

```
* Es prototipo es manipulado mediante Bluetooth
Los datos leídos son almacenados en una memoria sd.
I2C connection:
A5 - SCL
A4 - SDI

SD connection:
** MOSI - pin 11
** MISO - pin 12
** CLK - pin 13
** CS - pin 4
*/
#include <Servo.h>
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "MS5837.h"
#define sTemp A3 //Sensor de Temperatura conectado en A3
#define CS_sd 4 //Pin CS de SD card a pin 4 de Arduino

// Crea los objetos 3 motores
Servo MotorLeft, MotorRight, MotorCenter;

char BluetoothData; // the data received from bluetooth serial link
float pressure;

int xval=1500;    // Variable para leer el valor de xJ
int yval=1500;    // Variable para leer el valor de yJ
int zval=1500;    // Variable para leer el valor de yJ

//Esc pins
int escPin1 = 5; //ML
int escPin2 = 6; //MR
int escPin3 = 3; //MM

//Min, max & medium pulse
int minPulseRate = 1100;
int maxPulseRate = 1900;
int medPulseRate = 1500;

// Configura la Comunicación I2C para el sensor de presión
MS5837 bme;
```

```

void setup(){
  Serial.begin(9600); //Inicia la comunicación serial a 9600 b/s
  while(!Serial.available());
  Serial.print("MR0G0B0*"); //Apaga indicador de SD
  //Serial.print("BR0G0B0*"); //Apaga indicador de sensor Barometrico
  pinMode(CS_sd, OUTPUT);
  if (!SD.begin(CS_sd)) {
    Serial.print("MR255G0B0*"); //indica con un color rojo que hay problemas con la SD
    while (1);
  }
  Serial.print("MR0G255B0*"); //indica con un color verde que la SD está inicializada
  Serial.println("Starting");
  Wire.begin();

  bme.init();

  bme.setFluidDensity(997); // kg/m^3 (freshwater, 1029 for seawater)
  while (1);

  pressure=bme.pressure();

  //Init escs
  initEscs();

  Titulos();

}

void loop(){
  if (Serial.available()){
    BluetoothData=Serial.read(); //Get next character from bluetooth
    if(BluetoothData=='Z') {
      zval=400-Serial.parseInt(); // Lee el valor del Potenciometro Lineal (valor entre 0 y 400)
      zval = map(zval, 0, 400, minPulseRate, maxPulseRate); // Escala zval al rango de operacion del motor
    }
  }

  // Read the new throttle value, BT sends 'X__,Y__*' every 50ms
  if(BluetoothData=='X'){
    xval=Serial.parseInt(); // Lee el valor X del Joystick Virtual (valor entre 0 y 1023)
    xval = map(xval, 0, 800, minPulseRate, maxPulseRate); // Escala xval al rango de operacion del motor
    while (BluetoothData!='*'){
      if (Serial.available()){
        BluetoothData=Serial.read(); //Get next character from bluetooth
        if(BluetoothData=='Y'){
          yval=800-Serial.parseInt(); // Lee el valor Y del Joystick virtual(valor entre 0 y 1023)
          yval = map(yval, 0, 800, minPulseRate, maxPulseRate); // Escala yval al rango de operacion del
        }
      }
    }
  }
}

```

A. DIAGRAMA DE FLUJO Y CÓDIGOS

```
    }
  }
}

// Move Up/Down Submarine
MotorCenter.writeMicroseconds(zval);

// Move the Submarine Forward, Reverse, Left & Right
if (yval >= medPulseRate){
  if (xval == medPulseRate){
    xymove(yval, yval);
  }
  else if (xval < medPulseRate){
    xval=yval-(medPulseRate-xval);
    xymove(yval, xval);
  }
  else{
    xval=yval-(xval-medPulseRate);
    xymove(xval, yval);
  }
}
else {
  xymove(yval, yval);
}
bme.read();

//Lee los sensores y guarda los datos en la SD
guardar_datos(Temperatura(), bme.pressure(), bme.temperature(), bme.depth(), zval);
}

/*****Funciones para el Movimiento del Submarino*****/
//Init escs
void initEscs() {
  MotorLeft.attach(escPin1, minPulseRate, maxPulseRate);
  MotorRight.attach(escPin2, minPulseRate, maxPulseRate);
  MotorCenter.attach(escPin3, minPulseRate, maxPulseRate);

  //Init motors all escs at the same time with medPulseRate value
  MotorLeft.writeMicroseconds(medPulseRate);
  MotorRight.writeMicroseconds(medPulseRate);
  MotorCenter.writeMicroseconds(medPulseRate);
}

// Here's a function that makes the robot forward, reverse, turn left and turn right
void xymove(int xthrottle, int ythrottle) {
  MotorLeft.writeMicroseconds(xthrottle);
  MotorRight.writeMicroseconds(ythrottle);
}
```



```

/*****Funciones de Sensado*****/
float Temperatura(){
    const int sOg = 512; //0° en digital (R=100ohms, R_sensor=100ohms)
    const int s100g = 611; //100° en digital (R=100ohms, R_sensor=150ohms)
    int deltaT = s100g - sOg; // Diferencia entre temperatura maxima (100°C) y minima (0°) en digital
    float T = 0;
    T = analogRead(sTemp) - sOg;
    T = T/deltaT;
    T = T*100;
    return T;
}

void Titulos(){
    String dataString = ""; // Vacía el String para evitar problemas
    File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE); // Abre el archivo datalog.txt, si no existe lo crea.
    dataString = String("Temperatura [*C], Presion [Pa], Profundidad [m], Temperatura [*C], Z"); // Si el archi
    if (dataFile) {
        dataFile.println(dataString);
        dataFile.close();
    }
    else {
        Serial.print("MR255G0B0*"); //indica con un color rojo que hay problemas con la SD
        while(1);
    }
}

void guardar_datos(float Temp, float P, float D, float Temp2, int Z){
    String dataString = ""; // Vacía el String para evitar problemas
    dataString = String(Temp) + String(",") + String(P) + String(",")
    + String(D) + String(",") + String(Temp2) + String(",") + String(Z); // Si el archivo existe, escribimos en el.
    File dataFile = SD.open("DATALOG.TXT", FILE_WRITE); // Abre el archivo datalog.txt, si no existe lo crea.
    if (dataFile) {
        dataFile.println(dataString);
        dataFile.close();
    }
    else {
        //turn off all motors
        MotorLeft.writeMicroseconds(medPulseRate);
        MotorRight.writeMicroseconds(medPulseRate);
        MotorCenter.writeMicroseconds(medPulseRate);
        Serial.print("MR255G0B0*"); //indica con un color rojo que hay problemas con la SD
        while(1);
    }
}

```

Difusión y publicación de los resultados

En este apéndice se muestran las publicaciones en de este trabajo de tesis.



Figura 75

Diseño y Construcción de un Mini-submarino, con Fines de Exploración

J. E. Flores-Mena¹, L. Popoca Rodríguez, Yair I. González-Hernández, A. De Roa¹, K. A. Ramírez-Zavalza¹, M. Morín-Castillo¹, M. Gutiérrez-Arias¹, Juan Castillo Mixcóatl², O. Mauricio Moreno G.²,¹Facultad de Ciencias de la Electrónica, ²Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP. Av. San Claudio y 18 Sur, Col. San Manuel, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue., C. P. 72570.

Abstract— In this work we present the study of a mini-submarine, which involves mathematical modeling, mechanical construction and wireless communication. This study is a continuation of a previous work [14], with wired communication. The new version of the minisubmarine prototype was built with design parameters to explore shallow calm water (5m), for 2 hrs. The dynamic model of the prototype is built using the Newton-Euler formulation. The inertia moments, and the center of mass are obtained by means of a torsional pendulum. Immersion tests with the prototype are shown, also the motors characterization and wireless communication testing.

Palabras Claves— Comunicación Inalámbrica, Minisubmarino, Modelo Newton Euler, Péndulo de Torsión.

I. NOMENCLATURA

EM: Electromagnética
ESC: Electronic Speed Controller
DC: Direct Current
UVs: Underwater Vehicles
V: Volts

II. INTRODUCCIÓN

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 equipado con sensores capaz de medir las condiciones del sistema. A partir de esta valoración es posible implementar estrategias para limpiar los lagos o lagunas contaminados. Recientemente se ha trabajado con prototipos UVs [13, 14]. 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 nos proponemos diseñar y construir un UV con comunicación inalámbrica.

Un primer trabajo realizado como fundamento fue la construcción del prototipo con cables [14], que le llamamos Prototipo 1 (ver figura 1), en este trabajo se presenta evidencia del primer prototipo que sirvió para ganar experiencia en la construcción mecánica y la electrónica.

En este artículo también se reportan los avances en el diseño y la construcción del Prototipo 2 (ver figura 2), el modelo dinámico, el diseño y la construcción mecánica, la caracterización de los motores y la comunicación inalámbrica bajo el agua.

III. ANTECEDENTES



Fig1. Prototipo1, comunicación con cables.

TABLA I.- DIMENSIONES DEL PROTOTIPO 1.

Masa Total	3.085 kg
Largo Total	55 cm
Ancho Total	42 cm
Diámetro del Tubo	2.08 cm
Diámetro de Uniones	2.55 cm
Diámetro de la Capsula	11.109 cm
Largo de la Capsula	48.7 cm



Fig2. Prototipo2, comunicación inalámbrica.

IV. DESARROLLO

A. Modelo Matemático.

El modelo dinámico del mini submarino se dedujo a través de la formulación de Newton- Euler [1, 2], que se

B. DIFUSIÓN Y PUBLICACIÓN DE LOS RESULTADOS



Figura 77

Diseño y construcción de un mini submarino guiado a distancia

J.E. Flores-Mesa, E. Flores-Flores, L. Popoca-Rodríguez, Y. I. González-Hernández, M. Gutiérrez-Arias, M. Morán-Castillo.
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
J.E. Flores-Mesa, E. Flores-Flores Av. San Claudio y 18 sur, San Manuel, Puebla 72570, Pue., México.

Resumen— En este trabajo presentamos el diseño y construcción mecánica de un mini submarino. Este estudio es una continuación de un trabajo anterior [1, 2], en el cual, se presentó el modelo matemático y otros diseños. El mini submarino que se presenta en este documento fue construido con parámetros de diseño para explorar aguas tranquilas y poco profundas, 2m, y durante 2 horas. Pruebas de inmersión también son mostradas y la manipulación de los motores de forma alámbrica, mediante un PCB construido para probar el funcionamiento de dichos motores.

Palabras Clave— *Underwater Vehicle, minisubmarino, PCB, Electronic Speed Controller.*

Abstract— In this work we present the design and mechanical construction of a mini-submarine. This study is a continuation of a previous job [1, 2], in which introduced it the mathematical model and another designs. The mini submarine presented in this paper was built with design parameters to explore quiet and shallow waters, 2m, and for 2 hours. Immersion tests are also shown, the handling of the motors by wire, using a PCB built to test the operation of the engines.

Keywords— *Underwater Vehicle, mini submarine, PCB, Electronic Speed Controller.*

1. INTRODUCCIÓN

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 nos proponemos diseñar y construir un UV manipulado mediante comunicación inalámbrica.

Zona de suscripción de los autores y correos electrónicos

Un primer trabajo realizado como fundamento fue la construcción de dos mini-submarinos (Figura 1), ambos con cables. A partir de las ventajas, desventajas y la experiencia en la construcción mecánica y electrónica de cada diseño, se crea un nuevo modelo de mini submarino (Figura. 2). En este artículo, se reportan los avances un nuevo diseño, la construcción del nuevo mini-submarino, la caracterización de los motores y las pruebas de inmersión. Este mini submarino aún se encuentra en desarrollo, principalmente en la comunicación inalámbrica.



Figura 1.- Mini submarinos construidos. a) Prototipo1 [1], b) Prototipo2 [2].

Tabla 1.- Ventajas y desventajas de los prototipos 1 y 2 [1,2].

	Ventajas	Desventajas
Prototipo 1	Ligero Flotación Estable	Inmersión Ubicación para los motores Sellado de capsula
Prototipo 2	Flotación Sistema para el movimiento de motores	Inestabilidad Sellado de capsula

J. E. Flores-Mena, D. Hernández-Rodríguez, V. M. Fernández-Cruz,
M. Gutiérrez-Arias, M. Morín-Castillo, L. Popoca-Rodríguez,
Y. I. González-Hernández and A. Michua-Camarillo
Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón. 2014, Vol. 12, N° 2, pp 2133-2148

2133

*Internet Electronic Journal**
Nanociencia et Moletrónica

December 2014, Vol. 12, N°2, pp. 2133-2148

Experimental Measurement of the Inertia Tensor

J. E. Flores-Mena, D. Hernández-Rodríguez¹, V. M. Fernández-Cruz²,
M. Gutiérrez-Arias, M. Morín-Castillo, L. Popoca-Rodríguez,
Y. I. González-Hernández and A. Michua-Camarillo

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Puebla, Pue., 72570, México.
e-mail: hernandez.201120148@gmail.com¹, fernandez.201113986@gmail.com²

recibido: 26.03.14

publicado: 31.12.14

Figura 79

Bibliografía

- [1] *Water Quality - Lake Scientist*, Disponible en: <http://www.lakescientist.com/lake-facts/water-quality/> (accesado Abril 2015)
- [2] Infoespacial (2015). *La Nasa presenta un rover explorar el océano helado*. <http://www.infoespacial.com/mundo> (accesado 24 de noviembre de 2016).
- [3] Héctor A. Moreno, Roque Saltáren , Lisandro Puglis , Isela Carrera , Pedro Cárdenas , César Álvarez. (26/05/2015). *Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 11, 19. 26/11/2016, De <http://www.elsevier.es> Base de datos.
- [4] Fossen, T. I (1991). *Nonlinear Modeling and Control of Underwater Vehicles*. PhD Thesis. Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.
- [5] G. Antonelli: *Underwater Robots*, 2nd Edition, STAR 2, pp. 1–13, 2006. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [6] Anon, (2016), disponible en: <http://www.ashtead-technology.com/rental-equipment/eachytecrovingbat/> (accesado 21 de octubre de 2016).
- [7] ROVeXchange, *ROVs What are ROVs, What is an ROV (2016)*, Disponible en: <http://www.rovexchange.com> (accesado 21 de octubre de 2016).
- [8] *Remotely Operated Vehicle Committee Of The Marine Technology Society*, Web Rov.org (accesado octubre 2016).
- [9] NOAA Ocean Explorer, *Technology Submersibles*, <http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/subs.html> (accesado el 4 de Abril de 2016).
- [10] C.Scout, *Autonomous Underwater Vehicle: What Is An AUV*. Web Engr.mun.ca, (accesado el 4 Abril 2016).
- [11] NOAA Office Of Coast Survey: *Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*, 2017. Web. (accesado el 4 octubre. 2016).

BIBLIOGRAFÍA

- [12] Sham. Shamwerks, *Manual of USS Bubul 59*, Web Shamwerks.com (accesado el 4 octubre 2016).
- [13] Submarino EXPLORADOR GGDA/01. *Diseño y construcción de Gabriel Garcia*. N.p., 2016. Web (accesada el 4 octubre 2016).
- [14] *Serafina O Menor Submarino*. Do Mundo.Chc.org 2016. Web (accesado el 4 octubre 2016).
- [15] Fossen, T. I (1991). *Nonlinear Modeling and Control of Underwater Vehicles*. PhD Thesis. Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.
- [16] Lamb, H. (1932). *Hydrodynamics*, Cambridge University Press, London.
- [17] Newman, John Nicholas (1977). *Marine hydrodynamics*. Cambridge, Massachusetts.
- [18] Acosta, G., Curti, H., Calvo, O., Rossi, S., 2008. Some issues on the design of a low-cost autonomous underwater vehicle with an intelligent dynamic mission planner for pipeline and cable tracking. In: Inzartsev, A. (Ed.), *Underwater Vehicles*. InTech, Ch. 1, pp. 1–19.
- [19] *Submarine Technology*. Disponible en: Heiszwolf.com 2017. Web (accesado el 4 octubre 2016).
- [20] AMS. Disponible en: Associationofmodelsubmariners.com 2017. Web (accesado el 4 octubre 2016).
- [21] Andersen P, Kappel JJ, Spangenberg E (2009). Aspects of propeller developments for an underwater vehicle. First International Symposium on Marine Propulsor, Trondheim, Norway, WB2-2.
- [22] Benini E (2004). Significance of blade element theory in performance prediction of marine propellers. *Ocean Engineering*, 31, 957-974.
- [23] Carlton J (2006). *Marine propeller and propulsion*. Butterworth-Heinemann Ltd, London
- [24] Kim Jinhyun, Chung Wan Kyun (2006) Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles. *Ocean Eng* 33:566–586
- [25] Martínez, J., González, J., Balbona, L. y Blanco, E. Análisis del flujo en una hélice marina. Actas del XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. 2002. Disponible en: [http://www.uniovi.es/Áreas/Mecánica.Fluidos/investigacion/publicaciones/atrpdf/2002XVCIMhelice\(O-00-027\).pdf](http://www.uniovi.es/Áreas/Mecánica.Fluidos/investigacion/publicaciones/atrpdf/2002XVCIMhelice(O-00-027).pdf)

- [26] "Gobiernodecanarias". ecoblog, http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/ralgvgon_files/2013/05/CaracterC3ADsticas-Arduino.pdf, (accesado el 20 de septiembre de 2016).
- [27] "Openrov IMU/Compass/Depth Module". OpenROV, <https://store.openrov.com/collections/accessories/products/openrov-imu-depth-module>, (accesado el 20 de septiembre de 2016).
- [28] "Bluetooth Electronics". Keuwl, <http://www.keuwl.com/apps/bluetoothelectronics/>, (accesado el 20 de septiembre de 2016).
- [29] V. P. Spiridonov and A. A. Lopatkin, "Tratamiento Matemático de Datos Físico-Químicos", Ed. MIR Moscú, 1973.
- [30] J. E. Flores-Mena, D. Hernández-Rodríguez, V. M. Fernández-Cruz, M. Gutiérrez-Arias, M. Morín-Castillo, L. Popoca-Rodríguez, Y. I. González-Hernández and A. Michua-Camarillo, *Experimental Measurement of the Inertia Tensor*, Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón. 2014, Vol. 12, N° 2, pp 2133-2148
- [31] *Thursters*: <http://svseeker.com/rovthrusters.htm>(accesado el 20 de septiembre de 2016).
- [32] Painless360 Youtube Channel, Kalakoutsky, *RC Basics Understanding Electronic Speed Controllers (ESC)*, <https://www.youtube.com/watch?v=OZNxbxL7cdcl> (accesado el 20 de septiembre de 2016).
- [33] HobbyKing Store, *NTM Prop Drive 28-36, 750KV/265W (AU Warehouse)*, <http://www.hobbyking.com> (accesado el 20 de septiembre de 2016).