



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO

PROGRAMA DE
SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

**”Seguimiento de ductos con un mini submarino empleando
sensores acústicos”**

T E S I S

Que presenta

JOSÉ CARLOS RANGEL CAMACHO

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

Directores de la Tesis:

Dr. Rogelio Lozano

Dr. Jorge Torres

México, D.F.

Junio, 2015

Resumen

”Seguimiento de ductos con un mini submarino empleando sensores acústicos”

Gracias a la creación de programas de estudio por parte de las instituciones de investigación en México, ha sido posible que ciertas personas interesadas en el campo tecnológico, enfocado en vehículos autónomos, creen sistemas capaces de satisfacer la demanda de vehículos autónomos. Por lo que este trabajo se centra en el diseño, manufactura y control de un AUV (Sx-1013), tomando en cuenta los trabajos previos dentro del laboratorio de la UMI-LAFMIA y los proyectos hechos en otros países, como el SPARUS I [1].

El enfoque que se le da a este trabajo es en cuanto al desarrollo completo de un AUV con el uso de SONAR (mencionado posteriormente con mayor detalle) para el seguimiento de ductos y cables sobre el suelo marino. Cabe mencionar que, además del uso de SONAR con estos fines, otro uso que se le da es para el mapeo y generación de imágenes a partir de ondas acústicas. Diversos estudios han comprobado que ni la visión, ni las ondas de radio, ni la comunicación óptica son una buena opción para transmitir y recibir información, sin embargo la comunicación acústica ha tenido mejores resultados para poder recibir señales o datos bajo el agua.

Es importante agregar que existen diversos métodos de control empleados para los AUV's, sin embargo, por cuestiones de simplicidad y uso práctico, en este trabajo se aborda el controlador PD no lineal, aunque para el Sx-1013 se implementa también el controlador por *Backstepping* [2], en donde se consideraron las características básicas de un AUV como lo son los efectos físicos de un cuerpo sumergido y sus matrices de amortiguamiento y masa agregada.

Abstract

Thanks to the creation of programs of study by research institutions in Mexico, it has been possible for some people interested in technology, focusing on autonomous vehicles, they develop systems able to meet the demand for autonomous vehicles. So this work focuses on the design, manufacture and control of an AUV (SX-1013), taking into account previous work in the laboratory of UMI-LAFMIA and projects made in other countries, such as SPARUS I [1].

The approach given to this work as the full development of an AUV using SONAR (mentioned later in more detail) for pipelines and cables monitoring on the seafloor. It is noteworthy that, besides the use of SONAR for these purposes, other applications are acoustic mapping and imaging. Several studies have found that neither the artificial vision, nor radio waves or optical communication are a good option to send and receive information, however acoustic communication has been more successful in order to receive signals or data under water.

Also, there are various control methods used for the AUV's, however for its simplicity and practical use, this paper discusses a nonlinear PD controller, although a *Backstepping* controller [2] is implemented for the SX-1013, where the basic physical effects of an AUV, such as submerged body and its damping and added mass matrices are considered.

Agradecimientos

Al CINVESTAV Unidad Zacatenco por los recursos humanos, económicos y materiales proporcionados para obtener el grado de maestría.

A la UMI-LAFMIA por los recursos humanos, económicos y materiales proporcionados para obtener el grado de maestría.

Al CONACyT por los recursos económicos que me proporcionaron para pagar mis estudios y así obtener el grado de maestría.

Principalmente a mis padres y hermanas, por su gran cariño, esfuerzo y apoyo incondicional en cualquier tipo de decisión que tomé.

A mi familia por su ayuda para resolver cualquier problema que se me presentó, en especial a mi tío Ismael C. Camacho Cardel.

A Jaime Zavala Cetina y familia por su enorme ayuda y motivación.

A Sergio Reyes Sánchez por su apoyo en momentos críticos.

A mis compañeros de la UMI-LAFMIA.

Al Dr. Pedro Castillo, al Dr. Iván Tamanaja, al Dr. Rogelio Lozano, al Dr. Jorge Torres, al Dr. Aldo Orozco, al Dr. Sergio Salazar, al Dr. Omar Santos, al Dr. Eduardo Steed, al Dr. Hugo Romero, al Dr. Alexander Poznyak, por sus enseñanzas.

Al CNRS en Montpellier, Francia por su cálido recibimiento.

Dedicado a Carmen X. Camacho Cardel y a José Rangel García.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Índice general	IV
Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas	VIII
Abreviaturas	IX
1. Introducción	1
1.1. Argonauta.	2
1.2. Definición del problema: Seguimiento de un ducto usando sensores acústicos.	3
1.3. Hipótesis.	4
1.4. Objetivos.	4
2. Estado del arte.	5
2.1. SONAR	8
3. Modelo Matemático del submarino.	11
3.1. Cinemática.	11
3.1.1. Marcos de Referencia.	12
3.1.1.1. Marcos de referencia centrados en la Tierra.	12
3.1.1.2. Marcos de referencia geográficos.	12
3.2. Cinemática, modelo del AUV Sx-1013	17
3.3. Dinámica	18
3.3.1. Vector de restitución.	22
3.4. Dinámica del AUV Sx-1013	24
3.4.0.1. Marco inercial.	28
3.5. Simulación en lazo abierto.	30

4. Control	37
4.1. <i>Sliding mode</i>	37
4.2. Control PD no lineal para el caso de regulación con compensación de gravedad	42
5. Prototipo	45
5.1. Diseño mecánico	45
5.2. Diseño conceptual.	47
5.3. Diseño virtual.	47
5.4. Simulación.	48
5.5. Diseño detallado.	49
5.6. Fabricación.	50
5.7. Diseño electrónico.	52
5.7.1. Arquitectura electrónica.	53
5.7.2. Procesamiento.	53
5.7.2.1. Intel NUC y ROS.	53
5.7.2.2. DSP	55
5.7.3. Sensores.	56
5.7.3.1. IMU MicroStrain 3DM-GX1	56
5.7.3.2. IMU CHR6-LT.	57
5.7.3.3. Sensor de presión BMP085.	58
5.7.3.4. Sensor de presión Keller.	59
5.7.4. Comunicaciones.	62
5.7.4.1. Conectores.	62
5.7.4.2. FTDI y Convertidor RS-485.	62
5.7.4.3. Microcontrolador.	63
5.7.5. Potencia.	63
5.7.5.1. Motores.	63
5.7.5.2. Controladores de motores.	63
5.7.5.3. Baterías.	64
6. Sonar	66
6.1. Diseño conceptual.	66
6.2. Diseño virtual/Diseño detallado.	67
6.3. Fabricación.	67
7. Resultados y conclusiones.	69
7.1. AUV Sx-1013.	69
7.2. Experimentos.	73
7.3. Conclusiones y Perspectivas	77
Bibliografía	80

Índice de figuras

1.1. Museo de submarinos en Paris, Francia.	3
1.2. Definición del problema a resolver con el AUV.	4
2.1. Torpedo con trayectoria en línea recta hacia el objetivo.	5
2.2. Torpedo con trayectoria curva.	6
2.3. Torpedo cableado al submarino.	6
2.4. Capas del océano.	9
2.5. Compartimiento de potencia.	10
2.6. Compartimiento de control y electrónica.	10
3.1. Marcos de referencia.	13
3.2. Sistema coordenado del AUV	17
3.3. Fuerzas sobre el cuerpo del submarino.	24
3.4. Simulaciones.	31
3.5. Simulaciones.	32
3.6. Simulaciones, trayectoria en 3D.	32
3.7. Simulaciones.	32
3.8. Simulaciones.	33
3.9. Masa agregada a lo largo del eje x.	34
3.10. Masa agregada a lo largo del eje y.	35
4.1. Representación gráfica de una superficie deslizante.[1]	40
4.2. <i>Sliding mode</i> en z.	40
4.3. Señal de control utilizando la técnica de <i>sliding mode</i>	41
4.4. Control por <i>sliding mode</i>	41
5.1. Proceso empleado para el diseño del AUV.	46
5.2. Diseños previos.	47
5.3. Diseño virtual del AUV.	47
5.4. Virtualización del concepto 3.	48
5.5. Dibujo del AUV en CAD.	49
5.6. Dibujo CAD.	49
5.7. Diseño CAD detallado con todas sus piezas.	50
5.8. Manufactura de cilindros.	51
5.9. Manufactura de bridas.	51
5.10. Manufactura de tapas.	52
5.11. Estructura con los cilindros.	52

5.12. Diagrama del diseño del AUV.	53
5.13. Arquitectura de conexiones electrónicas del AUV.	53
5.14. Arquitectura electrónica del AUV.	54
5.15. CPU Intel NUC.	55
5.16. Esquema de nodos de ROS.	55
5.17. Procesador digital de señales ONIK.	56
5.18. IMU MicroStrain 3DM-GX1.	57
5.19. Gráfica de datos de la IMU MicroStrain 3DM-GX1 en ROS.	57
5.20. IMU CHR6-LT.	58
5.21. Sensor de presión BMP085.	59
5.22. Grafica con los datos del sensor de presión BMP085.	59
5.23. Sensor de presión Keller.	60
5.24. Gráfica de los datos del sensor de presión keller (ROS).	61
5.25. Gráfica con los datos del primer experimento con el sensor keller en una alberca.	61
5.26. Conectores.	62
5.27. Conectores.	62
5.28. Arduino uno R3.	63
5.29. Motores <i>Crustcrawler</i>	63
5.30. Controlador de motor.	64
6.1. Bosquejo del sonar de aire.	66
6.2. Dibujo CAD del sonar.	67
6.3. Movimiento del sonar.	68
7.1. Componentes principales del Sx-1013.	69
7.2. Ejes de movimiento del Sx-1013.	70
7.3. Manufactura de bridas.	70
7.4. AUV Sx-1013 completo y funcional.	71
7.5. Prototipo Sx-1013 con carcasa.	72
7.6. Profundidad deseada.	73
7.7. Control PD en z	74
7.8. Gráfica de la profundidad del AUV con PD	74
7.9. Velocidad angular en yaw con PD	75
7.10. Control PD en yaw	75
7.11. Orientación en yaw con PD	76
7.12. AUV con una orientación de yaw a cero grados	76
7.13.	77

Índice de cuadros

3.1. Notación SNAME para vehículos marinos.	12
3.2. Notación SNAME expresada en vectores.	14
5.1. Cálculo de potencia para el compartimento 1	64
5.2. Cálculo de potencia para el compartimento 2	65

Abreviaturas

UUV	Unmanned Underwater Vehicles
AUV	Autonomous Underwater Vehicles
ROV	Remote Operated Vehicles
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
DVL	Doppler Velocity Log
DOF	Degree Of Freedom
ECI	Earth Centered Inertial
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
NED	North East Down
LOS	Line Of Sight
DSP	Digital Signal Processor
ROS	Robot Operating System
SNAME	Society Naval Architects Marine Engineers
CLF	Control Lyapunov Function

Capítulo 1

Introducción

El océano juega un papel importante en la regulación del clima, en la producción de nutrientes, así como en la obtención de combustible fósil y el transporte. Como consecuencia, existe un vasto interés en su monitoreo por razones científicas, ambientales, comerciales y militares. Sin embargo, pese al interés existente, los ambientes acuáticos están en gran parte inexplorados debido a la carencia de tecnología que facilite los muestreos precisos, en tiempo real. Los vehículos submarinos son máquinas que revolucionaron el proceso de obtención de datos del océano. El concepto de vehículo sumergible no es una idea reciente. El primer submarino Americano fue el '*Turtle*' construido en 1775 por David Bushnel. En 1879, George W. Garrett diseñó el '*Resurgam*', considerado el primer submarino práctico de propulsión. En la actualidad hay diferentes tipos de vehículos submarinos.

Los vehículos y sus aplicaciones se han diversificado a través del tiempo, llevando a la humanidad hacia lugares, momentos y conocimiento nunca antes explorado. Tales dispositivos se han ramificado en terrestres, aéreos y submarinos; recientemente, han crecido y se han dividido en sistemas tripulados, teleoperados y autónomos. El interés creciente en cuanto a estas máquinas ha hecho que se investigue más a fondo las capacidades y usos que se les pueden dar.

Al hablar de vehículos submarinos, es importante destacar las dos ramas que tienen mayor impacto en la industria, los ROV's y los AUV's. Un ROV (*Remote Operated Vehicle*, por sus siglas en inglés) es un vehículo no tripulado, pero teleoperado; los usos más comunes que se le dan hoy en día a un ROV son en inspección de ductos submarinos y en el estudio

de fauna y flora marina, pero para usar estos sistemas se necesita de un equipo costoso, un barco, computadoras especializadas, cable de comunicación, tripulación, etc. Los AUV's (*Autonomous Underwater Vehicle*, por sus siglas en inglés) es un vehículo no tripulado y autónomo. La gran ventaja de estos dispositivos es que pueden viajar cientos de kilómetros vertical y horizontalmente, con la capacidad de regresar al punto del que fueron lanzados o a cualquier otro punto sin intervención humana (al iniciar la misión). A diferencia del ROV, el AUV tiene que ser más eficiente en el uso de energía, ya que necesita de baterías, las cuales eventualmente tienen que recargarse.

Actualmente se han realizado diversos trabajos en algunos países (E.U., Japón, China, España, Francia, Alemania, entre otros), en cuanto a AUV's. En México a penas inicia el desarrollo de estos sistemas, como consecuencia de la demanda en determinados campos de investigación como la oceanografía, geología y biología marina, etc. Además del uso que se le da a estos dispositivos en el campo petrolero, como lo es en PEMEX, para la investigación del fondo marino y la inspección de ductos que transportan gas y crudo, ya sea por medio de sonares o con algoritmos de visión [3]. Un área significativa de aplicación para un AUV, es la milicia, como torpedos, AUV's de búsqueda y reconocimiento, etc.

1.1. Argonauta.

En París, Francia se encuentra el museo del Argonauta, en donde se puede apreciar un submarino tripulado antiguo, lo que permite entender los principios del funcionamiento de los mismos. También cuenta con una sección de temas recientes en donde se exponen dispositivos como torpedos, en los cuales se observa cierta similitud estructural a los AUV's actuales. En las similitudes que cabe resaltar, se encuentran los sistemas acústicos implementados para el seguimiento de objetivos y el uso de *O-rings* para la hermeticidad de todo el sistema, principalmente localizados en los ejes de motores, superficies de control y en la cabeza acústica, incluso la geometría de sus estructuras.

En la figura 1.1 se ilustran el submarino Argonauta y la estructura interna de un torpedo.

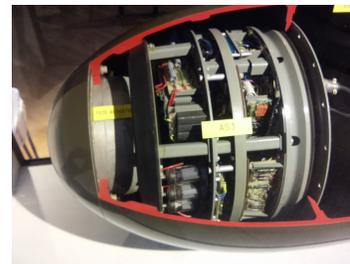
Algunos de estos datos fueron tomados en cuenta para el diseño del prototipo Sx-1013.



(A) Parte trasera del submarino tripulado (Argonauta).



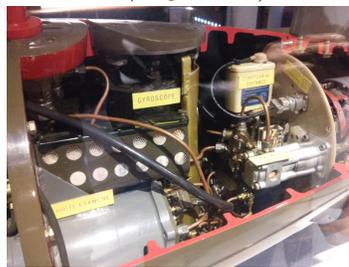
(B) Cuerpo del submarino tripulado (Argonauta).



(C) Cabeza acústica del torpedo.



(D) Propulsión del torpedo.



(E) Electrónica, computadora y sistemas estabilizadores del torpedo.



(F) Torpedo completo en vista lateral.

FIGURA 1.1: Museo de submarinos en Paris, Francia.

1.2. Definición del problema: Seguimiento de un ducto usando sensores acústicos.

El problema a resolver, es que el AUV con ayuda del sonar, se mantenga a una distancia (r_A) constante de un ducto que se encuentra en el fondo marino, por lo que en la siguiente figura (1.2) se puede apreciar que existe un marco de referencia inercial (O) a partir del cual se mide la distancia a la que se encuentra el submarino, pero se conoce la ubicación del ducto. Con esto se puede decir que se puede ubicar la posición en el eje y del submarino.

Las variables que dependen del tiempo son, la posición de x y la posición de y . Pero se desea que se mueva a velocidad constante en el eje x . La velocidad en y es variable. El ducto puede considerarse como un pivote alrededor del cual el submarino tiene que moverse y la magnitud de r_A debe de ser mínima.

Los datos que se conocen son:

- La distancia r_A .
- El ángulo al que se encuentra el ducto.
- La profundidad del AUV.
- La velocidad a la que se desplaza el AUV ($u = cte.$).

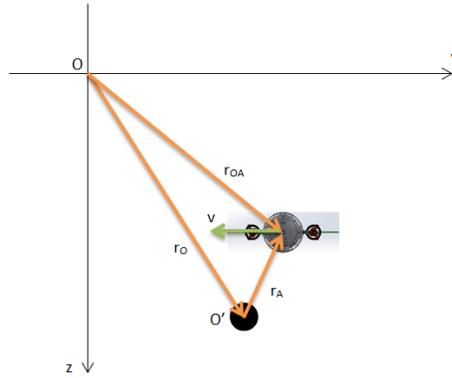


FIGURA 1.2: Definición del problema a resolver con el AUV.

1.3. Hipótesis.

Se puede conocer la posición del AUV Sx-1013 a partir de la posición de un ducto y navegar dependiendo de la trayectoria que siga el ducto.

1.4. Objetivos.

- Diseñar un prototipo de un AUV.
- Fabricación del prototipo AUV Sx-1013.
- Implementar un control PD no lineal para la estabilización del AUV.
- Realizar pruebas con el AUV utilizando los algoritmos de control.

Capítulo 2

Estado del arte.

Como antecedente de este trabajo, se presenta el torpedo utilizado en la segunda guerra mundial por el submarino de nombre Argonauta. El propósito principal de dicho torpedo era el de causar un gran daño al casco de un buque (el objetivo), que al entrar en contacto con este, explota para ocasionar una filtración de agua, cuyo resultado es fatal para el objetivo. El torpedo es considerado como un pequeño submarino, pero que viaja más rápido, contiene una carga explosiva y es un sistema no tripulado, como los sistemas conocidos AUV. Anteriormente, el torpedo seguía una trayectoria en línea recta (figura 2.1); el trabajo del submarino era asegurar el encuentro entre el torpedo y el objetivo (se calculaba la trayectoria de impacto). Si la ruta o la velocidad del torpedo hacia el objetivo se calculaban mal, este podía fallar y perderse.

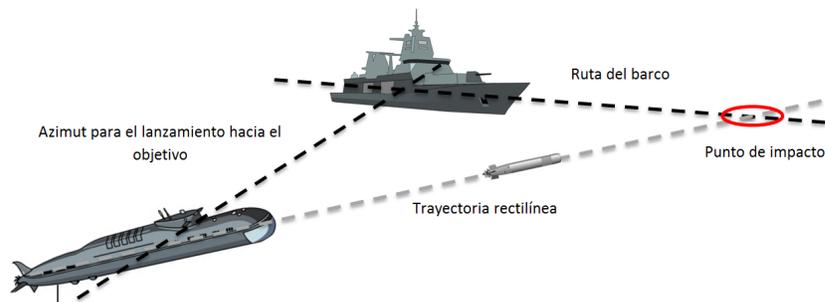


FIGURA 2.1: Torpedo con trayectoria en línea recta hacia el objetivo.

Los torpedos actuales son “inteligentes”, gracias a su referenciación acústica (uso de sonar). Lanzado con una trayectoria programada, el torpedo entra en modo autónomo una vez que

se ha detectado el objetivo y avanza hacia él hasta impactarlo (figura 2.2).



FIGURA 2.2: Torpedo con trayectoria curva.

Una característica adicional, es que el submarino dirige al torpedo con ayuda de la comunicación por cable, que conecta a ambos (figura 2.3). Tiene un alcance de 20,000m.



FIGURA 2.3: Torpedo cableado al submarino.

El torpedo en su parte trasera tiene el propulsor con dos juegos de propelas para avanzar hacia adelante, además cuenta con superficies de control para girar en los ángulos de *pitch* y *yaw*. Es decir, tiene 5 grados de libertad ($x, y, z, pitch, yaw$). Sus principales componentes son: sonar, ojiva, detonador, giroscopios, baterías, computadora, motor, propelas y superficies de control. Este es un claro ejemplo de lo que puede llegar a ser un AUV con aplicación militar, de entre muchas otras aplicaciones como ya se ha mencionado. Es importante recalcar que el sonar se encuentra en la punta del torpedo para la localización del objetivo, ya que el presente trabajo involucra un AUV con un sonar para el seguimiento de ductos. Hoy en día hay mucho trabajo acerca del uso de sonares en diversas aplicaciones como, encontrar peces,

obtención de imágenes del fondo marino, mapeo del fondo marino, búsqueda de submarinos, navegación, entre otros. Este trabajo se enfoca en el uso del sonar para navegación. La navegación se basa en la obtención de parámetros específicos que son de gran ayuda para que el submarino se desplace en su entorno para realizar tareas definidas o misiones. Una de las aplicaciones de mayor utilidad de los AUV es el seguimiento de cables y ductos sumergidos; el mantenimiento preventivo de la infraestructura sumergida, la preservación del ecosistema como consecuencia de dicho mantenimiento, hacen del uso de los AUV benéfico, con lo que da valor a la explotación comercial de estos dispositivos. Hoy en día las inspecciones de ductos se llevan a cabo con vehículos operados remotamente. El uso de ROV's tiene dos principales desventajas: la calidad de datos adquiridos y la inversión necesaria para pagar un barco y su tripulación cada vez que se hace una inspección, además de que la velocidad de inspección es lenta, la cual disminuye a medida que aumenta la profundidad [5].

Anteriormente ya se han realizado trabajos que sustituyen a los ROV, como el uso del Geosub en cuyo desarrollo intervinieron universidades como Heriot-Watt (Reino Unido), Universidad nacional técnica de Atenas (Grecia), Universidad de las islas Baleares (España), corporaciones como Innovatum International Ltd. (Reino Unido), Alcatel Submarine Networks (Estados Unidos), Subsea7(Reino Unido), British Petroleum (Reino Unido).

El sonar pasivo, mencionado anteriormente, fue colocado en un AUV llamado Ocean Explorer II (OEXII), el cual se posiciona en el fondo marino para funcionar como una base estacionaria, con lo que logran medir y localizar fuentes de banda ancha que generan ruido ambiental en la región costera [6].

2.1. SONAR

El SONAR es el acrónimo para navegación con sonido (*SOund Navigation And Ranging*, en inglés). Esta tecnología es similar al RADAR, que es el acrónimo para detección por ondas de radio (*Radio Detection And Ranging*, en inglés), cuya diferencia radica en el medio (agua o aire) en que se utiliza y en el tipo de onda (mecánica o electromagnética). El ultrasonido, que típicamente se usa, en frecuencias altas, para aplicaciones médicas y frecuencias bajas para sismicidad (sedimentos). Aunque el uso de sonido en el agua no es un tema nuevo (Leonardo Da Vinci, 1490), el primer sonar se diseñó como consecuencia directa del hundimiento del Titanic en 1912, en donde el requerimiento básico era el de detectar icebergs a 2 millas (3.218688km) de distancia. El sonido es un conjunto de perturbaciones de presión que viaja como una onda, referido también como ondas de compresión, ondas longitudinales y ondas mecánicas. Bajo el agua, el sonido es usado por algunas especies de animales para comunicación y ecolocación. Las vibraciones acústicas, se pueden caracterizar con lo siguiente:

- Periodo de la onda $T[s]$
- Frecuencia $f = 1/T[Hz]$
- Velocidad del sonido $c[m/s]$
- Longitud de onda $\lambda = c/f[m]$

Algunos de los factores que afectan a la propagación de las ondas acústicas submarinas son:

- Pérdida y atenuación.
- Refracción.
- Dispersión.
- Ruido.

Hay que tener en cuenta que el agua oceánica se divide en capas (figura 2.4), las cuales influyen también en cómo se propagan las ondas acústicas.

- Capa superficial.
- Termoclina estacional (temporada).
- Termoclina permanente.
- Capa profunda isotérmica.

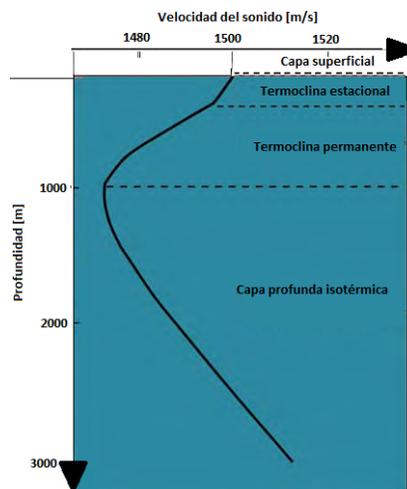


FIGURA 2.4: Capas del océano.

Los factores que se deben de tomar en cuenta para trabajar con acústica bajo el agua son:

- Temperatura.
- Velocidad del sonido.
- PH.
- Salinidad.
- Profundidad.

Existen dos modos operacionales del sonar, el sonar pasivo y el sonar activo. El sonar pasivo es aquel en el que la fuente acústica es radiada por el objetivo y el sonar solo recibe señales acústicas.

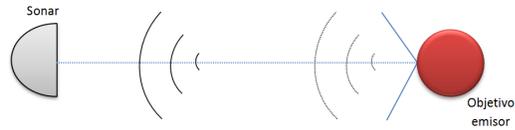


FIGURA 2.5: Compartimiento de potencia.

El sonar activo es aquel en donde el mismo sonar emite señales acústicas, las cuales se propagan en el agua, se reflejan en el objetivo y regresan al receptor del sonar [7].

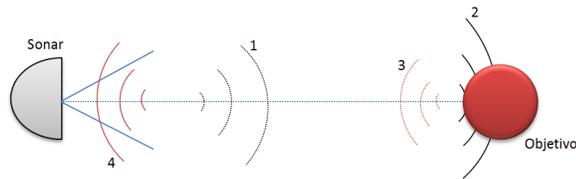


FIGURA 2.6: Compartimiento de control y electrónica.

Capítulo 3

Modelo Matemático del submarino.

El modelo matemático del submarino que vamos a utilizar para el diseño y el análisis del control, se explicara en esta sección. La dinámica del submarino puede ser dividida en 2 partes: cinemática, que trata solo aspectos geométricos del movimiento, y la dinámica que consiste en el análisis de las fuerzas que causan movimiento.[8]

3.1. Cinemática.

Las ecuaciones de movimiento de un vehículo marino de 6 grados de libertad pueden ser expresadas en forma vectorial. [9]

$$\dot{\eta} = J_{\Theta}(\eta)v \quad (3.1)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (3.2)$$

Ambas ecuaciones se detallarán en las próximas secciones.

En los vehículos marinos el hecho de que se muevan en 6 grados de libertad (DOF), son necesarias 6 coordenadas independientes para determinar la posición y la orientación, en un vector. Las primeras 3 coordenadas dentro del vector corresponden a la posición y el movimiento translacional a lo largo de los ejes x , y y z , mientras que las últimas tres coordenadas

describen la orientación y el movimiento rotacional, los 6 grados de libertad o componentes de movimiento se definen como *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* y *yaw*. Véase cuadro 3.1.

CUADRO 3.1: Notación SNAME para vehículos marinos.

DOF		Fuerzas y momentos	Velocidad lineal y angular	Posiciones y ángulos de Euler
1	movimientos en dirección x (<i>surge</i>)	X	u	x
2	movimientos en dirección y (<i>sway</i>)	Y	v	y
3	movimientos en dirección z (<i>heave</i>)	Z	w	z
4	rotación alrededor de x (<i>roll</i>)	K	p	ϕ
5	rotación alrededor de y (<i>pitch</i>)	M	q	θ
6	rotación alrededor de z (<i>yaw</i>)	N	r	ψ

3.1.1. Marcos de Referencia.

Los marcos de referencia que se utilizan para el análisis de las fuerzas y movimientos de los vehículos marinos se clasifican en 2; Marcos de referencia centrados en la Tierra y Marcos de referencia geográficos. [10]

3.1.1.1. Marcos de referencia centrados en la Tierra.

ECI: Marco Inercial Centrado en la Tierra $i = (x_i, y_i, z_i)$. En este marco son usadas las leyes de Newton de movimiento, también se utiliza para el sistema de navegación inercial.

ECEF: Marco Terrestre Centrado en el Centro de la Tierra $e = (x_e, y_e, z_e)$. Sus ejes rotan al rededor del marco inercial antes mencionado, este marco es usualmente utilizado para describir el movimiento de barcos en tránsito entre continentes.

3.1.1.2. Marcos de referencia geográficos.

NED: Marco Noreste Bajo $n = (x_n, y_n, z_n)$. Este marco es relativo a la superficie elipsoide de la tierra en un plano tangente, este es el sistema coordenado el que nos referimos en la vida diaria. Para tener la localización n con respecto a e es necesario los ángulos que denotaran longitud y latitud.

BODY: Marco con referencia en el cuerpo $b = (x_b, y_b, z_b)$. Éste, está en movimiento con respecto al marco anterior y está siempre posicionado en el vehículo, se utiliza para el análisis de fuerzas y movimientos actuando directamente en el vehículo.

En la figura 3.1 se ilustran los marcos de referencia antes mencionados.

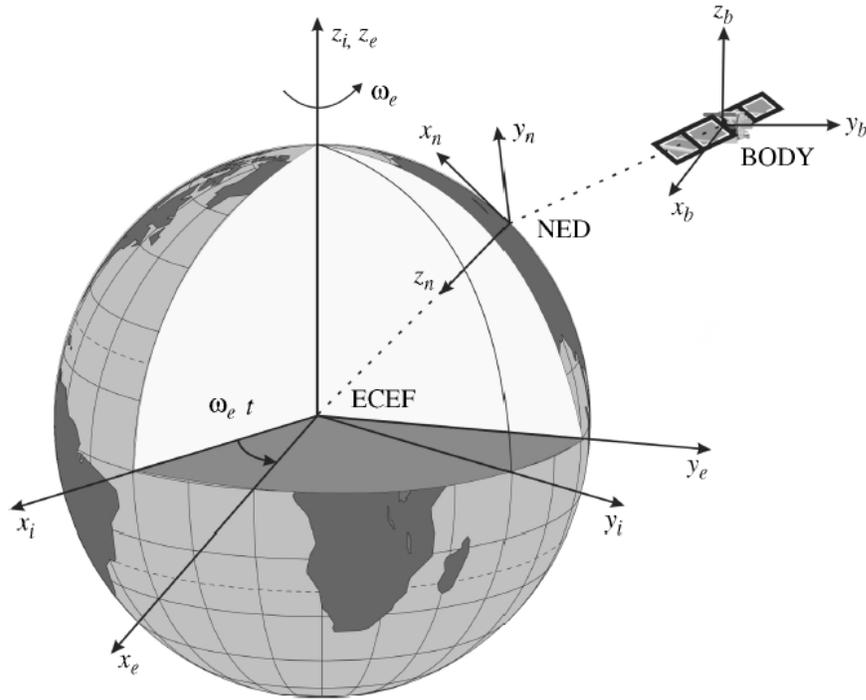


FIGURA 3.1: Marcos de referencia.

La ecuación en general que describe el movimiento de un vehículo marino con 6DOF y origen en O_b , se describe por los siguientes vectores.

$$\eta = \begin{bmatrix} p_{b/n}^n \\ \Theta_{nb} \end{bmatrix} \quad v = \begin{bmatrix} v_{b/n}^b \\ \omega_{b/n}^b \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} f_b^b \\ m_b^b \end{bmatrix}$$

donde η denota el vector de posición y orientación, la posición esta expresada en coordenadas NED y es un vector de ángulos de Euler. ν denota el vector de velocidades lineales y angulares en el marco del cuerpo y τ describe las fuerzas y momentos que actúan en el vehículo en el marco del cuerpo. Para vehículos marinos la siguiente notación sera utilizada para vectores en sistemas coordenados $\{b\}$, $\{e\}$ y $\{n\}$:

$v_{b/n}^e$ = velocidad lineal del punto o_b con respecto a $\{n\}$ expresado en $\{e\}$

$\omega_{n/e}^b$ = velocidad angular de $\{n\}$ con respecto a $\{e\}$ expresado en $\{b\}$

f_b^n = fuerza con línea de acción sobre el punto o_b expresado en $\{n\}$

m_b^n = momento alrededor del punto o_b expresado en $\{n\}$

Θ_{nb} = ángulos de Euler entre $\{n\}$ y $\{b\}$

CUADRO 3.2: Notación SNAME expresada en vectores.

ECEF posición	$p_{b/e}^e = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$	Longitud y latitud	$\Theta_{en} = \begin{bmatrix} l \\ \mu \end{bmatrix} \in \mathbb{S}^2$
NED posición	$p_{b/n}^n = \begin{bmatrix} N \\ E \\ D \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$	Posición (ángulos de Euler)	$\Theta_{nb} = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \in \mathbb{S}^3$
Velocidad lineal fijada en el cuerpo	$v_{b/n}^b = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$	Velocidad angular fijada en el cuerpo	$\omega_{b/n}^b = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$
Fuerza fijada en el cuerpo	$f_b^b = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$	Momento fijado en el cuerpo	$f_b^b = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3$

Transformación entre el marco de referencia BODY y NED.

Para transformar nuestras ecuaciones de un marco de referencia a otro es necesaria la matriz de rotación R la cual satisface las siguientes propiedades: $RR^T = R^T R = I$, $\det(R) = 1$

Lo que implica que R es ortogonal.

Las matrices de rotación son las siguientes, considerando que:

$$\cos \theta = c\theta, \cos \phi = c\phi, \cos \psi = c\psi, \sin \theta = s\theta, \sin \psi = s\psi, \sin \phi = s\phi$$

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix}; R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}; R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Una vez que se determinan las matrices de rotación, sabemos que éstas giran cada una alrededor de un eje, por convención éstas son consideradas z , y y x para rotar de $\{n\}$ a $\{b\}$ especificadas en los ángulos de Euler, esta rotación es matemáticamente equivalente a:

$$R_b^n(\Theta_{nb}) := R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \quad (3.3)$$

$$R_b^n(\Theta_{nb})^{-1} = R_n^b(\Theta_{nb}) = R_{x,\phi}^T R_{y,\theta}^T R_{z,\psi}^T$$

$$R_b^n(\Theta_{nb}) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

El vector de velocidad con respecto al cuerpo se puede expresar en $\{n\}$ como:

$$\dot{p}_{b/n}^n = R_b^n(\Theta_{nb}) v_{b/n}^b \quad (3.5)$$

Donde $\dot{p}_{b/n}^n$ es el vector de velocidad en NED. Expandiendo la ecuación anterior se tiene:

$$\dot{N} = u(c\psi c\theta) + v[c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi] + w[s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta] \quad (3.6)$$

$$\dot{E} = u(s\psi c\theta) + v[c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi] + w[s\theta s\psi c\phi - c\psi s(\phi)] \quad (3.7)$$

$$\dot{D} = -u(s\theta) + v(c\theta s\phi) + w(c\theta c\phi) \quad (3.8)$$

La velocidad angular en el cuerpo $\omega_{b/n}^b = [p \ q \ r]^T$ y el vector de los ángulos de Euler $\dot{\Theta}_{nb} = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ están relacionadas con la matriz de transformación $T_{\Theta}(\Theta_{nb})$ de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\dot{\Theta}_{nb} = T_{\Theta}(\Theta_{nb}) \omega_{b/n}^b \quad (3.9)$$

donde la matriz $T_{\Theta}(\Theta_{nb})$ esta dada por:

$$T_{\Theta}^{-1}(\Theta_{nb}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \Rightarrow T_{\Theta}(\Theta_{nb}) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi \tan \theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}$$

Por tanto si se desarrolla la ecuación 6.10 tendremos las ecuaciones de la posición con ángulos de Euler.

$$\dot{\phi} = p + q(s\phi \tan \theta) + r(c\phi \tan \theta) \quad (3.10)$$

$$\dot{\theta} = q(c\phi) - r(s\phi) \quad (3.11)$$

$$\dot{\psi} = q \frac{s(\phi)}{c(\theta)} + r \frac{c(\phi)}{c(\theta)} \theta \neq_{\pm} 90 \quad (3.12)$$

La representación vectorial de las ecuaciones cinemáticas para 6 *DOF* son:

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= J_{\Theta}(\eta)v \\ \Downarrow \\ \begin{bmatrix} \dot{p}_{b/n}^n \\ \dot{\Theta}_{nb} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_b^n(\Theta_{nb}) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T_{\Theta}(\Theta_{nb}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{b/n}^b \\ \omega_{b/n}^b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.2. Cinemática, modelo del AUV Sx-1013

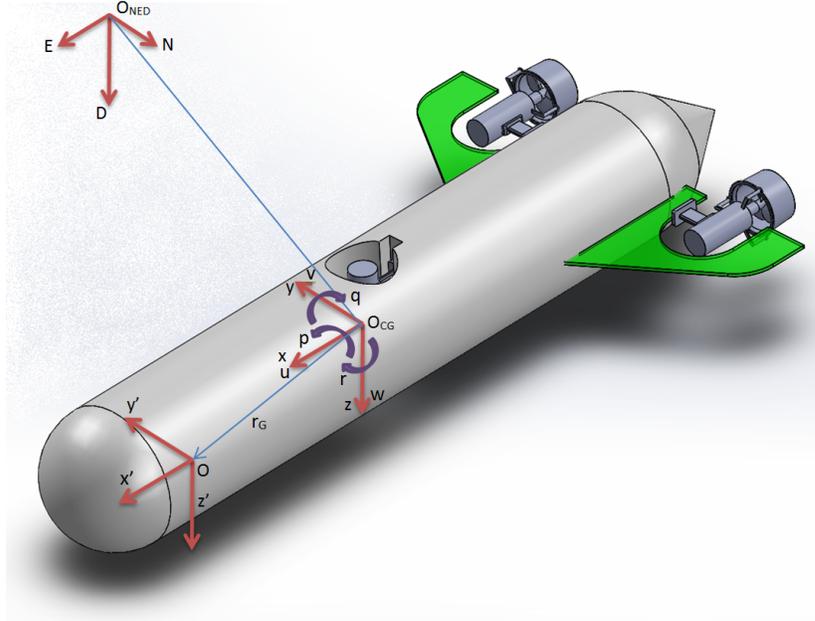


FIGURA 3.2: Sistema coordinado del AUV

Dadas las ecuaciones generales de cinemática para un AUV que se mostraron anteriormente, la cinemática del vehículo esta dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{n} \\ \dot{e} \\ \dot{d} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w(s\phi s\psi + c\phi c\psi s\theta) - v(c\phi s\psi - c\psi s\theta s\phi) + u(c\theta c\psi) \\ v(c\phi c\psi + s\theta s\phi s\psi) - w(c\psi s\phi - c\phi s\theta s\psi) + u(c\theta s\psi) \\ w(c\theta c\phi) - u(s\theta) + v(c\theta s\phi) \\ p + r(c\phi \tan \theta) + q(s\phi \tan \theta) \\ q(c\phi) - r(s\phi) \\ r \frac{c\phi}{c\theta} + q \frac{s\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Tomando en cuenta una configuración de tres motores, donde *pitch* y *roll* son estables mecánicamente ($\theta \approx 0$ y $\phi \approx 0$, respectivamente) y la velocidad lineal en *y* es estable aproximadamente a cero, como se explica en la sección de AUV Sx-1013, el modelo cinemático que se obtuvo es el siguiente:

$$\dot{\eta} = J(\eta) \nu \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{n} \\ \dot{e} \\ \dot{d} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v(s\psi) + u(c\psi) \\ v(c\psi) + u(s\psi) \\ w \\ 0 \\ 0 \\ r \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Con las ecuaciones anteriores se obtiene un sistema cinemático con 4 *DOF* que corresponde a la configuración de motores que tiene el *AUV* Sx-1013 mostrado en la figura 3.2

3.3. Dinámica

La ecuación general para un vehículo submarino es propuesta por (Fossen 2003), usa la forma de la ecuación general de robótica para manipuladores. La ecuación general que representa la dinámica de los vehículos submarinos es la siguiente:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + g_0 + w \quad (3.17)$$

donde:

- M - Matriz del sistema inercial (incluyendo la masa agregada).
- $C(v)$ - Matriz de coriolis centrípeta.
- $D(v)$ - Matriz de amortiguamiento.
- $g(\eta)$ - Vector gravitacional, fuerzas boyantes y momentos.
- τ - Vector de entradas de control.
- g_0 - Vector usado para ajuste (control de lastre).
- w - Vector de perturbaciones ambientales.

Fuerzas con respecto al marco O:

$$f_O = m (\dot{v}_O + \omega \times v_O + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times (\omega \times r_G)) \quad (3.18)$$

$$f_C = m (\dot{v}_C + \omega \times v_C) \quad (3.19)$$

Momentos con respecto al marco O:

$$m_O = I_O \dot{\omega} + \omega \times (I_O \omega) + m r_G \times (\dot{v}_O + \omega \times v_O) \quad (3.20)$$

$$\text{con } O = O_{CG}, r_G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$m_C = I_C \dot{\omega} + \omega \times (I_C \omega) \quad (3.21)$$

De acuerdo con el SNAME (1950) se utiliza la siguiente notación:

$$f_O = \tau_1 = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T \quad : f_0 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \text{ fuerzas externas}$$

$$m_O = \tau_2 = \begin{bmatrix} K & M & N \end{bmatrix}^T \quad : m_0 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \text{ momento generado por las fuerzas externas}$$

$$v_O = \nu_1 = \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix}^T \quad : v_0 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \text{ velocidad lineal de } X_O Y_O Z_O$$

$$\omega = \nu_2 = \begin{bmatrix} p & q & r \end{bmatrix}^T \quad : \omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \text{ velocidad angular de } X_O Y_O Z_O$$

$$r_G = \begin{bmatrix} x_G & y_G & z_G \end{bmatrix}^T \quad : r_1 = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \text{ centro de gravedad}$$

El vector de velocidades lineales y angulares son:

$$\nu = \begin{bmatrix} v_O \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Las fuerzas son:

$$f_0 = m (\dot{v}_0 + \omega \times v_0 + \dot{\omega} \times r_1 + \omega \times (\omega \times r_1)) \quad (3.23)$$

$$f_0 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \dot{u} - \dot{r}y_G + \dot{q}z_G + q(py_G - qx_G) + r(pz_G - rx_G) + qw - rv \\ \dot{v} + \dot{r}x_G - \dot{p}z_G - p(py_G - qx_G) + r(qz_G - ry_G) - pw + ru \\ \dot{w} - \dot{q}x_G + \dot{p}y_G - p(pz_G - rx_G) - q(qz_G - ry_G) + pv - qu \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Los momentos son:

$$m_0 = I_0 \dot{\omega} + \omega \times (I_0 \omega) + m r_1 \times (\dot{v}_0 + \omega \times v_0) \quad (3.25)$$

$$m_0 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}I_x - \dot{r}I_{xz} - \dot{q}I_{xy} + r(pI_{xy} - qI_y + rI_{yz}) - q(pI_{xz} - rI_z + qI_{yz}) + my_G(\alpha) - mz_G(\beta) \\ \dot{q}I_y - \dot{r}I_{yz} - \dot{p}I_{xy} - r(qI_{xy} - pI_x + rI_{xz}) + p(pI_{xz} - rI_z + qI_{yz}) - mx_G(\alpha) + mz_G(\gamma) \\ \dot{r}I_z - \dot{q}I_{yz} - \dot{p}I_{xz} + q(qI_{xy} - pI_x + rI_{xz}) - p(pI_{xy} - qI_y + rI_{yz}) + mx_G(\beta) - my_G(\gamma) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Donde el tensor de inercia con referencia al marco del cuerpo es: I_O :

$$I_O = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}; \quad (I_O = I_O^T > 0) \quad (3.27)$$

El vector generalizado de fuerzas (movimiento traslacional) y momentos (movimiento de rotación) expresados en el marco O se tiene:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m(\dot{u} - \dot{r}y_G + \dot{q}z_G + q(py_G - qx_G) + r(pz_G - rx_G) + qw - rv) \\ m(\dot{v} + \dot{r}x_G - \dot{p}z_G - p(py_G - qx_G) + r(qz_G - ry_G) - pw + ru) \\ m(\dot{w} - \dot{q}x_G + \dot{p}y_G - p(pz_G - rx_G) - q(qz_G - ry_G) + pv - qu) \\ \dot{p}I_x - \dot{r}I_{xz} - \dot{q}I_{xy} + r(pI_{xy} - qI_y + rI_{yz}) - q(pI_{xz} - rI_z + qI_{yz}) + my_G(\alpha) - mz_G(\beta) \\ \dot{q}I_y - \dot{r}I_{yz} - \dot{p}I_{xy} - r(qI_{xy} - pI_x + rI_{xz}) + p(pI_{xz} - rI_z + qI_{yz}) - mx_G(\alpha) + mz_G(\gamma) \\ \dot{r}I_z - \dot{q}I_{yz} - \dot{p}I_{xz} + q(qI_{xy} - pI_x + rI_{xz}) - p(pI_{xy} - qI_y + rI_{yz}) + mx_G(\beta) - my_G(\gamma) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\alpha = \dot{w} + pv - qu$$

$$\beta = \dot{v} - pw + ru$$

$$\gamma = \dot{u} + qw - rv$$

3.3.1. Vector de restitución.

Teniendo la fórmula general, se requieren algunos datos para hacer los cálculos para el diseño del modelo matemático completo del AUV Sx-1013. En esta parte se presenta el cálculo del vector gravitacional.

Peso:

$$W = mg \tag{3.29}$$

donde

m - es la masa total del vehículo.

g - es la aceleración gravitacional.

Flotabilidad:

$$B = \rho_f g \nabla \tag{3.30}$$

donde

ρ_f - densidad del agua.

∇ - volumen desplazado por el vehículo.

Las fuerzas de restitución que actúan sobre el cuerpo son: El peso,

$$f_g^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

La fuerza de flotabilidad,

$$f_b^n = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Al pasar las fuerzas de restitución (peso y flotabilidad) del marco inercial al marco del cuerpo, se tiene:

$$f_g^b = J_1^{-1} f_g^n = \begin{bmatrix} -Ws\theta \\ Wc\theta s\phi \\ Wc\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$f_b^b = J_1^{-1} f_b^n = \begin{bmatrix} Bs\theta \\ -Bc\theta s\phi \\ -Bc\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

La fuerza gravitacional actúa a través del centro de gravedad (CG) definido en:

$$r_g^b = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

La fuerza de flotabilidad actúa a través del centro de flotabilidad (CF) definido en:

$$r_b^b = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ -z_b \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Los momentos estan definidos por:

$$m_i^b = r_i^b \times f_i^b \quad (3.37)$$

El vector de fuerzas y momentos de restitución $g(\eta)$ es:

$$g(\eta) = - \begin{bmatrix} f_g^b + f_b^b \\ r_g^b \times f_g^b + r_b^b f_b^b \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

sustituyendo los valores y realizando las operaciones correspondientes resulta lo siguiente:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} Ws\theta - Bs\theta \\ Bc\theta s\phi - Wc\theta s\phi \\ Bc\theta c\phi - Wc\theta c\phi \\ By_b c\theta c\phi + Bz_b c\theta s\phi - Wy_G c\theta c\phi + Wz_G c\theta s\phi \\ Bz_b s\theta + Wz_G s\theta - Bx_b c\theta c\phi + Wx_G c\theta c\phi \\ By_b s\theta - Wy_G s\theta + Bx_b c\theta s\phi - Wx_G c\theta s\phi \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.4. Dinámica del AUV Sx-1013

La figura 3.3 muestra las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.

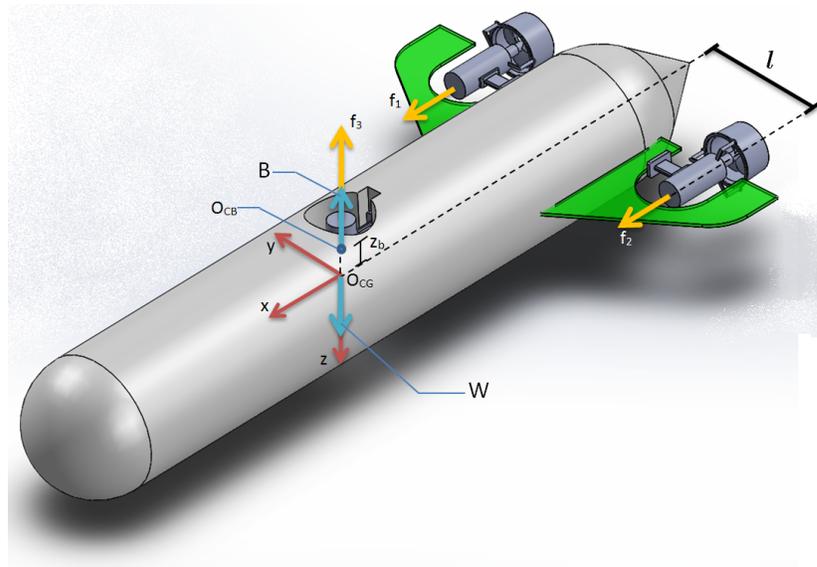


FIGURA 3.3: Fuerzas sobre el cuerpo del submarino.

Para este modelo se consideró lo siguiente (caso ideal):

- El origen coordenado O coincide con el origen coordenado de CG, $r_G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$
- El cuerpo es simétrico.
- No hay perturbaciones.
- El centro de flotabilidad es colineal con el centro de gravedad.
- No se considera la matriz de coriolis.

$$M\dot{\nu} + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (3.40)$$

Con las suposiciones la matriz M queda como sigue:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (3.41)$$

donde la matriz de masas e inercias del sistema es:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}mR^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{12}m(3d^2 + L^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{12}m(3d^2 + L^2) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

La matriz de masa agregada se define como:

$$M_A = \begin{bmatrix} -0,1\bar{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\pi\rho R^2 L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\pi\rho R^2 L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{12}\pi\rho R^2 L^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{12}\pi\rho R^2 L^3 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

donde:

m = masa del cuerpo del *AUV*.

R = radio del cuerpo cilíndrico del *AUV*.

ρ = densidad del cuerpo del *AUV*.

L = longitud total del cuerpo del *AUV*.

d = diámetro del cuerpo cilíndrico del *AUV*.

La matriz de deslizamiento (*damping*) es obtenida de la siguiente manera: [11]

$$D(v)v = \begin{bmatrix} \tau_{Dx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_{Dy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{Dz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau_{D\phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{D\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_{D\psi} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

donde:

$$\tau_{D_i} = -\frac{1}{2}C_{D_i}A_i\rho_f u_i |u_i|$$

C_{D_i} = coeficiente de *drag*, A_i = Área transversal de la superficie, ρ_f = densidad del fluido,

u_i = velocidad en el marco del cuerpo.

$$\tau_{Dx} = -\frac{1}{2}(1,06)\left(\left(\frac{1}{2}d\right)^2\pi\right)\rho_f u_i |u_i| = -3.8293\pi |u| = -12.03 |u|$$

$$\tau_{Dy} = -\frac{1}{2}(0,89)(0,1275)\rho_f v_i |v_i| = -56.738 |v|$$

$$\tau_{Dz} = -\frac{1}{2}(0,89)(0,1275)\rho_f w_i |w_i| = -56.738 |w|$$

$$\tau_{D\phi} = -\frac{1}{2}(1,06)\left(\left(\frac{1}{2}d\right)^2\pi\right)\rho_f p_i |p_i| = -3.8293\pi |p| = -12.03 |p|$$

$$\tau_{D\theta} = -\frac{1}{2}(1,06)(0,1275)\rho_f q_i |q_i| = -67.575 |q|$$

$$\tau_{D\psi} = -\frac{1}{2}(1,06)(0,1275)\rho_f r_i |r_i| = -67.575 |r|$$

Teniendo la matriz de masa M , la matriz de amortiguamiento $D(\nu)$ y el vector de restitución $g(\eta)$ se desarrollan y se obtiene el siguiente modelo matemático en el marco del cuerpo.

$$\begin{bmatrix} 18,0\dot{u} \\ 2.9763\dot{v} \\ 2.9763\dot{w} \\ 0,07225\dot{p} \\ 0,28404\dot{q} \\ 0,28404\dot{r} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tau_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (W - B)s\theta \\ (B - W)c\theta s\phi \\ (B - W)c\theta c\phi \\ Bz_b c\theta s\phi \\ Bz_b s\theta \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 18,0\dot{u} - (s\theta)(B - W) + 12.03u|u| \\ 2.9763\dot{v} + 56.738v|v| + (c\theta s\phi)(B - W) \\ 2.9763\dot{w} + 56.738w|w| + (c\theta c\phi)(B - W) \\ 0,07225\dot{p} + 12.03p|p| + Bz_b c\theta s\phi \\ 0,28404\dot{q} + 67.575q|q| + Bz_b s\theta \\ 0,28404\dot{r} + 67.575r|r| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 + f_2 \\ 0 \\ f_3 \\ 0 \\ 0 \\ l(f_1 - f_2) \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Se considera que el submarino tiene una fuerza de 0.981N más de flotabilidad (B) que de peso (W).

Tomando en cuenta la configuración de los motores y que es mecánicamente estable en pitch y roll la ecuación anterior queda como sigue:

$$\begin{bmatrix} 18,0\dot{u} + 12.03u |u| \\ 2.9763\dot{v} + 56.738v |v| \\ 2.9763\dot{w} + 56.738w |w| \\ 0 \\ 0 \\ 0,28404\dot{r} + 67.575r |r| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 + f_2 \\ 0 \\ f_3 \\ 0 \\ 0 \\ l(f_1 - f_2) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

3.4.0.1. Marco inercial.

En esta sección se detalla el análisis y desarrollo de la dinámica del AUV con referencia en el marco inercial.

Para obtener el modelo matemático con respecto al marco inercial se necesita rotar las ecuaciones en el marco del cuerpo mediante la siguiente matriz de rotación.

$$J = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - c\phi s\psi & s\phi s\psi + c\phi c\psi s\theta & 0 & 0 & 0 \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\theta s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - s\psi s\phi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi \tan \theta & c\phi \tan \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix}$$

La matriz de rotación se conforma de una parte rotacional y una parte traslacional, estos componentes son las siguientes matrices de rotación.

$$R = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - c\phi s\psi & s\phi s\psi + c\phi c\psi s\theta \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\theta s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & s\phi \tan \theta & c\phi \tan \theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{1}{c\theta} s\phi & \frac{1}{c\theta} c\phi \end{bmatrix}$$

Una vez teniendo esta matriz, se toma el modelo en el marco del cuerpo y aplicamos la rotación, también se considera estable en *pitch* y *roll*, para tener un modelo particular a nuestro AUV.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.5556 \times 10^{-2} f_1 + 5.5556 \times 10^{-2} f_2 + 5.5556 \times 10^{-2} (s\theta) (B - W) - 0,66833u |u| \\ -19.063v |v| - 0,33599 (c\theta s\phi) (B - W) \\ 0,33599 f_3 - 19.063w |w| - 0,33599 (c\theta c\phi) (B - W) \\ -166.51p |p| - 13.841Bz_b c\theta s\phi \\ -237.91q |q| - 3.5206Bz_b s\theta \\ 0,31686f_1 - 0,31686f_2 - 237.91r |r| \end{bmatrix}$$

considerando $\theta = 0$ y $\phi = 0$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5.5556 \times 10^{-2} f_1 + 5.5556 \times 10^{-2} f_2 + 5.5556 \times 10^{-2} (s\theta) (B - W) - 0,66833u |u| \\ -19.063v |v| - 0,33599 (c\theta s\phi) (B - W) \\ 0,33599 f_3 - 19.063w |w| - 0,33599 (c\theta c\phi) (B - W) \\ -166.51p |p| - 13.841Bz_b c\theta s\phi \\ -237.91q |q| - 3.5206Bz_b s\theta \\ 0,31686f_1 - 0,31686f_2 - 237.91r |r| \end{bmatrix}$$

Por lo tanto obtenemos el modelo matemático con referencia al marco inercial siguiente:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (s\psi) (19.063y' |y'|) + (c\psi) (5.5556 \times 10^{-2} f_1 + 5.5556 \times 10^{-2} f_2 - 0,66833x' |x'|) \\ (s\psi) (5.5556 \times 10^{-2} f_1 + 5.5556 \times 10^{-2} f_2 - 0,66833x' |x'|) - (c\psi) (19.063y' |y'|) \\ 0,33599f_3 - 19.063z' |z'| - 0,33599(B - W) \\ 0 \\ 0 \\ 0,31686f_1 - 0,31686f_2 - 237.91\psi' |\psi'| \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

3.5. Simulación en lazo abierto.

Para entender mejor el comportamiento del *AUV*, es necesario simular su modelo con ayuda de *MATLAB/Simulink*. Por lo que se hace primero un análisis de dicho comportamiento con algunas entradas conocidas (*thrusters*).

$\rho_f = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$: densidad del fluido.

$m = 20 [kg]$: masa del cuerpo.

$\bar{m} = 20 [kg]$: masa del cuerpo

$L = 0,75 [m]$: longitud total del cuerpo.

$d = 0,17 [m]$: diámetro del cuerpo.

$R = (1/2)d = 0,085 [m]$: radio del cuerpo.

$V = 3,141592 (r_1)^2 L = 1,7024 \times 10^{-2} [m^3]$: volumen del cuerpo.

$l = 0,09 [m]$: distancia perpendicular del eje x del cuerpo, al eje de los motores traseros (*thrusters*).

Las condiciones iniciales para estas simulaciones son $x = 2$, $y = 3$ y $z = 5$. Al ser simulaciones en lazo abierto solo se encienden los motores cierto tiempo y se observa su comportamiento.

Las velocidades iniciales son cero.

En la imagen 3.4a se muestra una simulación de la posición en donde se puede observar el comportamiento del prototipo en el agua, sin encender motores y sin perturbaciones. También en la imagen 3.4b se muestra el mismo comportamiento, pero con diferentes condiciones iniciales, y se puede observar que los estados convergen al equilibrio. Posteriormente las figuras 3.5a y 3.5b muestran sus velocidades respectivamente. Posteriormente se muestra la trayectoria en 3D en las figuras 3.6a y 3.6b.

Adicionalmente en la figura 3.7a se muestra la simulación del comportamiento del vehículo con los 3 motores encendidos, durante un periodo de tiempo de 100 segundos con valores deseados en los estados. En la figura 3.7b se muestran las fuerzas de los motores que actúan en el sistema para x , y y z . En la figura 3.8a se muestran las velocidades para este caso. Por último en la figura 3.8b se muestra la trayectoria en 3D del comportamiento del submarino.

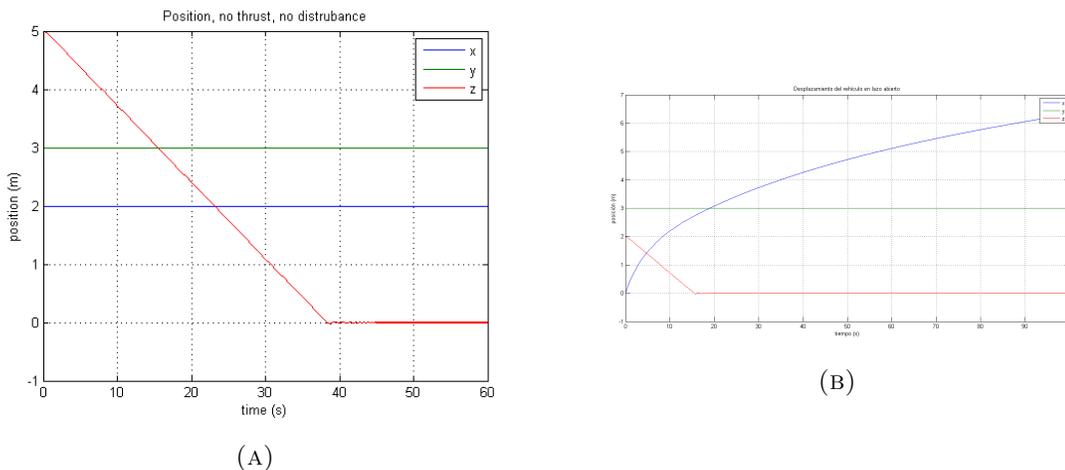


FIGURA 3.4: Simulaciones.

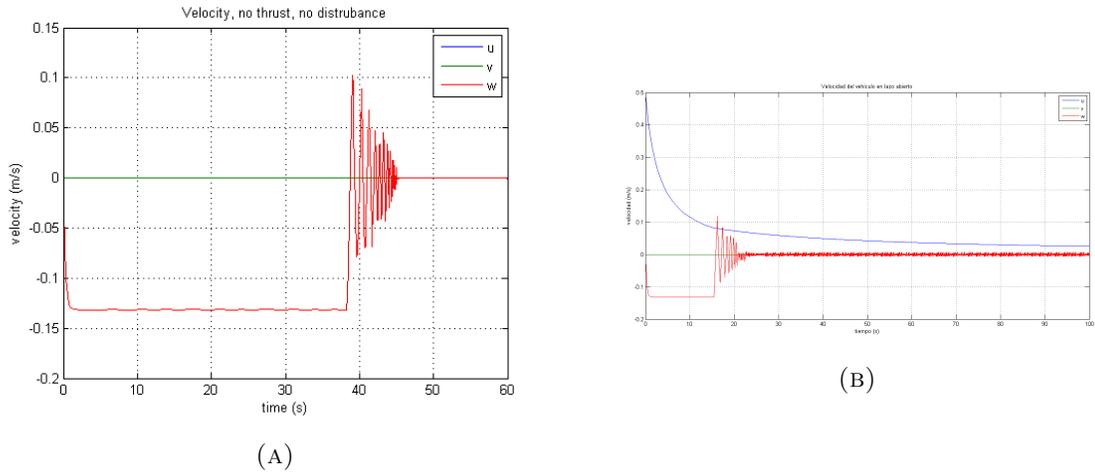


FIGURA 3.5: Simulaciones.

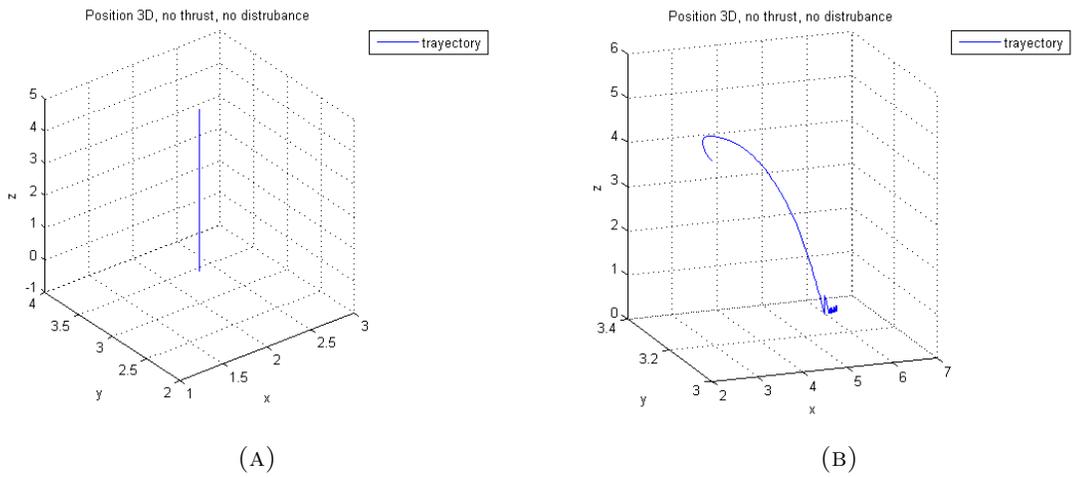


FIGURA 3.6: Simulaciones, trayectoria en 3D.

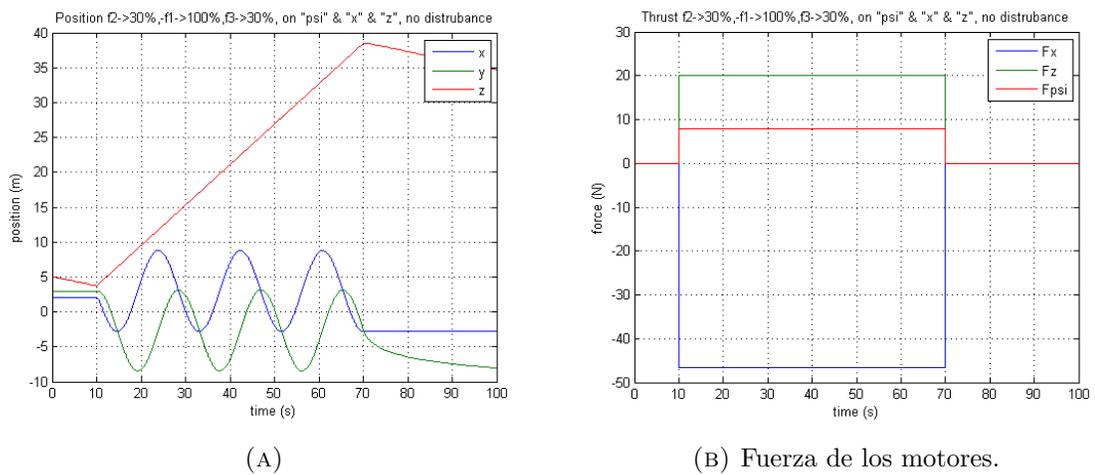


FIGURA 3.7: Simulaciones.

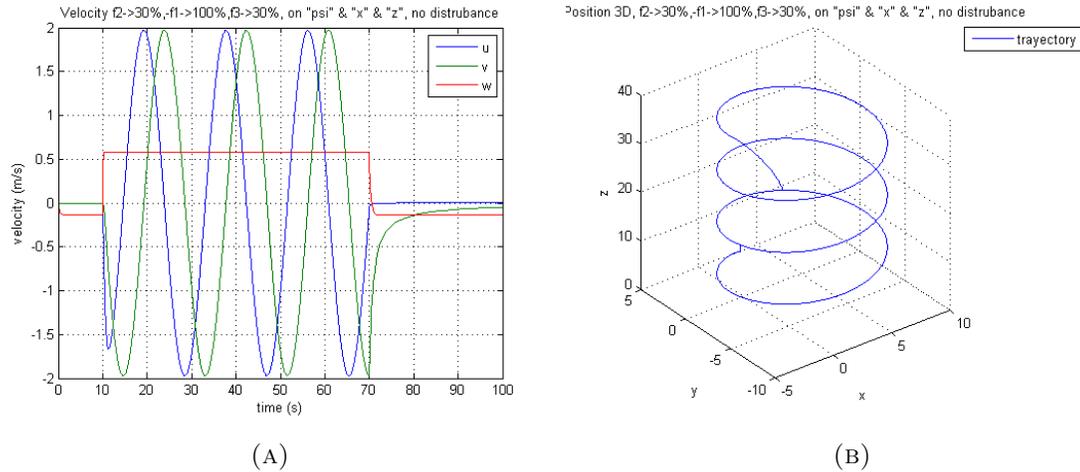
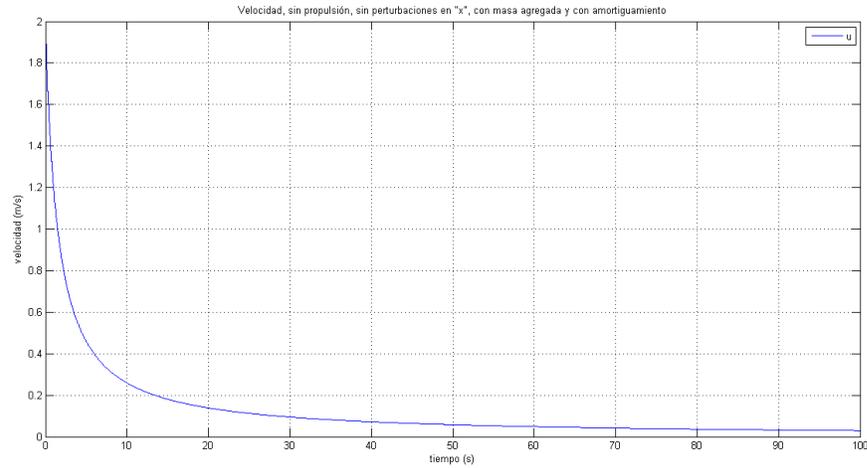


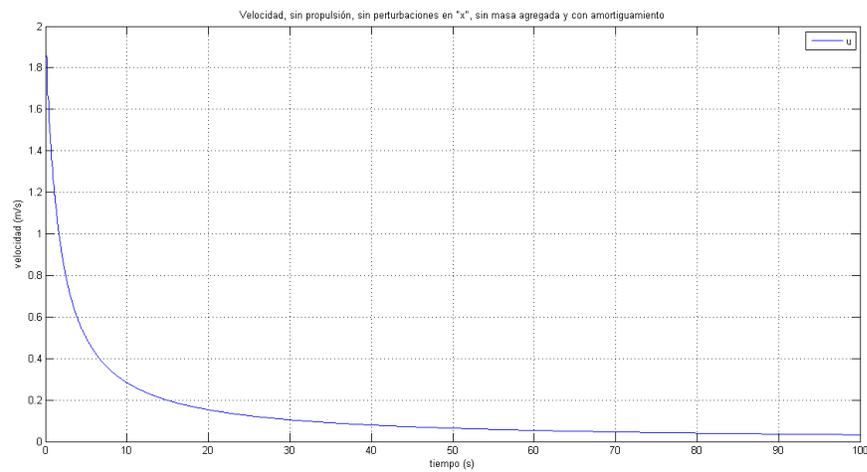
FIGURA 3.8: Simulaciones.

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo se consideró la masa agregada del AUV, esta es la masa del agua que se añade a la masa del vehículo afectando su dinámica, está depende de la velocidad y del área transversal, si la masa agregada no añade cambios significativos esto quiere decir que tiene un diseño hidrodinámico, en otras palabras habrá menos fuerzas que se opongan al movimiento del AUV, por lo que se hicieron las simulaciones correspondientes para demostrar sus efectos, los cuales muestran que con masa agregada disminuye la velocidad 1.2m/s. Las condiciones iniciales para las simulaciones siguientes fueron, $\nu = [2, 0, 0, 0, 0, 0]$ (figura 3.9) y $\nu = [0, 2, 0, 0, 0, 0]$ (figura 3.10).

La figura 3.9 muestra la diferencia entre las velocidades en el desplazamiento a lo largo del eje x del AUV.



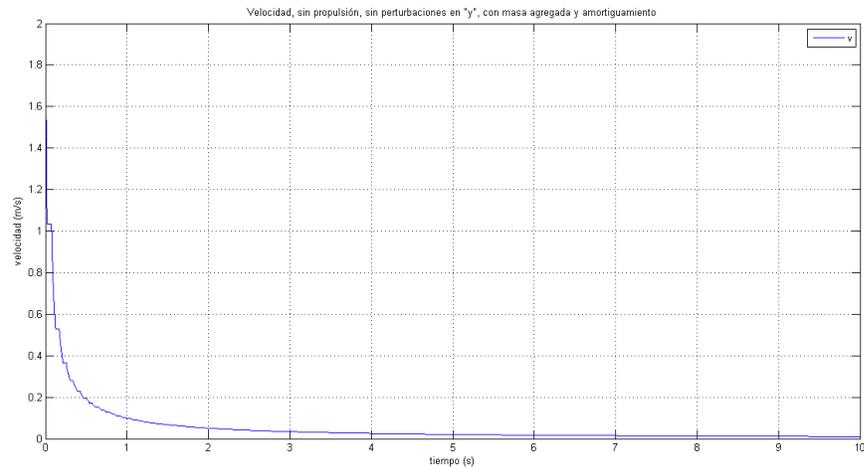
(A) Velocidad del AUV con masa agregada y con amortiguamiento



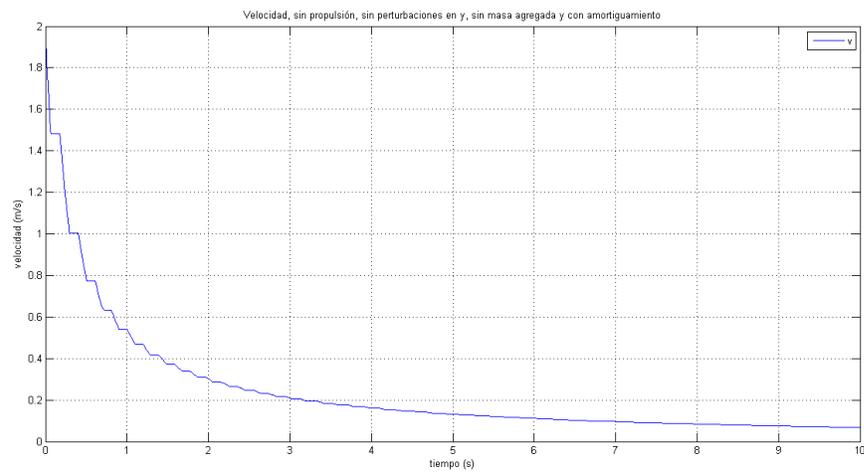
(B) Velocidad del AUV sin masa agregada y con amortiguamiento

FIGURA 3.9: Masa agregada a lo largo del eje x.

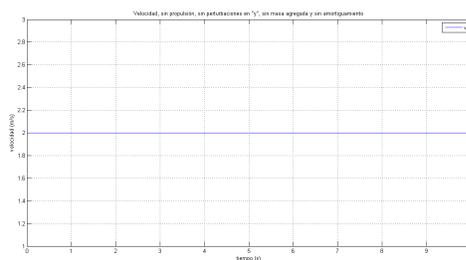
La figura 3.10 muestra la diferencia entre las velocidades en el desplazamiento a lo largo del eje y del AUV, pero eliminando también a la matriz de amortiguamiento. Con esto, se puede apreciar que al eliminar dicha matriz, no existe fuerza que haga perder energía al AUV en su desplazamiento.



(A) Velocidad del AUV con masa agregada y con amortiguamiento.



(B) Velocidad del AUV sin masa agregada y con amortiguamiento



(C) Velocidad del AUV sin masa agregada y sin amortiguamiento

FIGURA 3.10: Masa agregada a lo largo del eje y.

Se puede apreciar que no se realizó la simulación para el desplazamiento en el eje z , ya que la geometría del AUV es la misma para el desplazamiento en los ejes y y z , con la diferencia que

en el eje z , se ve afectado el desplazamiento por las fuerzas de restitución. En consecuencia, se puede ver con mayor claridad la diferencia del movimiento.

Capítulo 4

Control

Dada la infinidad de controladores utilizados hoy en día para sistemas autónomos, este trabajo pretende mostrar algunas de las leyes de control utilizadas en un AUV tal como, *sliding mode* o modo deslizante y *PD* no lineal.

4.1. *Sliding mode*

Desde el punto de vista del control, el modelado de incertidumbres se clasifica en dos tipos:

- Incertidumbres estructuradas (o paramétricas).
- Incertidumbres no estructuradas (o dinámicas no modeladas).

La primera corresponde a incertidumbres en los términos incluidos en el modelo, la segunda, corresponde a incertidumbres en el orden del sistema.

Es claro que las incertidumbres pueden tener un efecto no deseado y muy significativo para los sistemas de control no lineales. Es por ello que se ha desarrollado teoría de *control robusto*. Este tipo de control esta compuesto por una parte nominal o similar a la ley de control de linealización o inversa, además de otros términos que ayudan a contrarrestar los efectos de la

incertidumbre en el modelo. A esta ley de control le llamaremos control por modo deslizante (*sliding mode*).

El controlador deslizante provee un acercamiento sistemático al problema de mantener la estabilidad y desempeño consistente a pesar de la imprecisión en el modelo.

En el caso de este trabajo, solo se ha considerado el control del AUV en el eje z . Por lo que tendremos un sistema SISO sobre z .

Cosidere la dinámica del sistema una entrada-una salida:

$$\ddot{z} = f(z) + b(z)u$$

Sea $\tilde{z} = z - z_d$ el error de seguimiento (*tracking*) para la variable z , con un escalar de seguimiento s :

$$s = \dot{\tilde{z}} + \lambda\tilde{z} \quad (4.1)$$

donde:

$\lambda > 0 \rightarrow$ Es el ancho de banda del control.

Para $s=0$ (superficie deslizante con dinámica exponencial)

$$\tilde{z} = \tilde{z}(t_0)e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (4.2)$$

$$\tilde{z}(t_0) = z_0 \quad (4.3)$$

lo cual asegura que el error de tracking converge a cero en tiempo finito cuando $s=0$ (*sliding mode*).

El objetivo principal de este tipo de controlador es encontrar una ley de control no lineal que asegure que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = 0 \quad (4.4)$$

Por ejemplo:

$$\tau = m\ddot{z}_\tau + d|\dot{z}| \dot{z}_\tau - K_d s - K \operatorname{sgn}(s) \quad (4.5)$$

donde: $K, K_d \geq 0$

Se supone que se puede asignar lo siguiente:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = M\dot{\alpha} + N\nu - Kz_2 - hz_1 \quad (4.6)$$

donde $K = \operatorname{diag}(k_1, k_2, k_3) > 0$ esto resulta en:

$$\dot{V} = -cz_1^2 - z_2^T K z_2 < 0 \quad (4.7)$$

y de acuerdo a Lyapunov esto garantiza que (z_1, z_2) están acotadas y convergen a cero.

Como solo se pueden asignar valores a τ_1 y τ_3 esto es:

$$\tau_1 = m_{11}\dot{\alpha}_1 + n_{11}u - k_1(u - \alpha_1) \quad (4.8)$$

$$\tau_3 = m_{32}\dot{\alpha}_2 + m_{33}\dot{\alpha}_3 + n_{32}v + n_{33}r - k_3(r - \alpha_3) - z_1 \quad (4.9)$$

Este tipo de controlador es robusto ante perturbaciones y ya ha sido usado en vehículos submarinos, además, tiene un alto costo en cómputo. Sin embargo, provee de un acercamiento sistemático al problema para mantener la estabilidad y el rendimiento consistente a pesar de las imprecisiones del modelado.

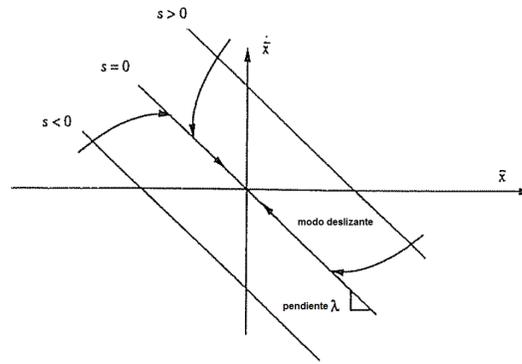
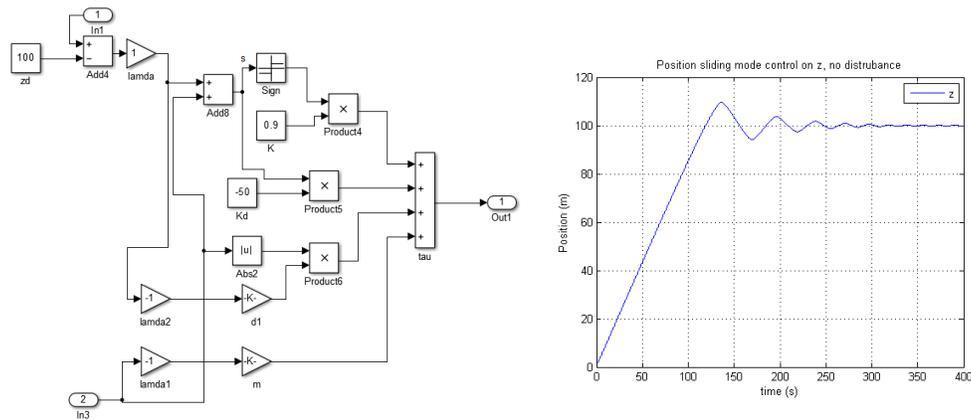


FIGURA 4.1: Representación gráfica de una superficie deslizante.[1]

Al realizar las simulaciones del modelo implementando el control por *sliding mode* o modo deslizante sobre el eje z , la figura 4.2a representa el diagrama a bloques del control, hecho en *simulink*, para llevar al submarino a un punto deseado $z_d = 100\text{m}$ de profundidad. La figura 4.2b muestra que el control funciona y lleva al vehículo a una profundidad de 100m, así mismo, este se estabiliza alrededor de los 350 segundos de la simulación en dicho punto.



(A) Diagrama en *simulink* del control de *sliding mode* para el eje z . (B) Simulación del movimiento en z del AUV.

FIGURA 4.2: *Sliding mode* en z .

Esto demuestra que el sistema esta desacoplado para el subsistema en z y el subsistema xy . Por lo que se puede aplicar un control diferente, si así se desea, en ambos subsistemas. De igual forma, es evidente que el control no hace cambios muy bruscos. Véase figura 4.3.

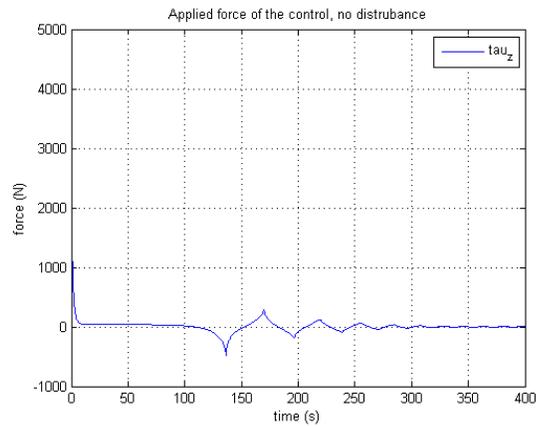
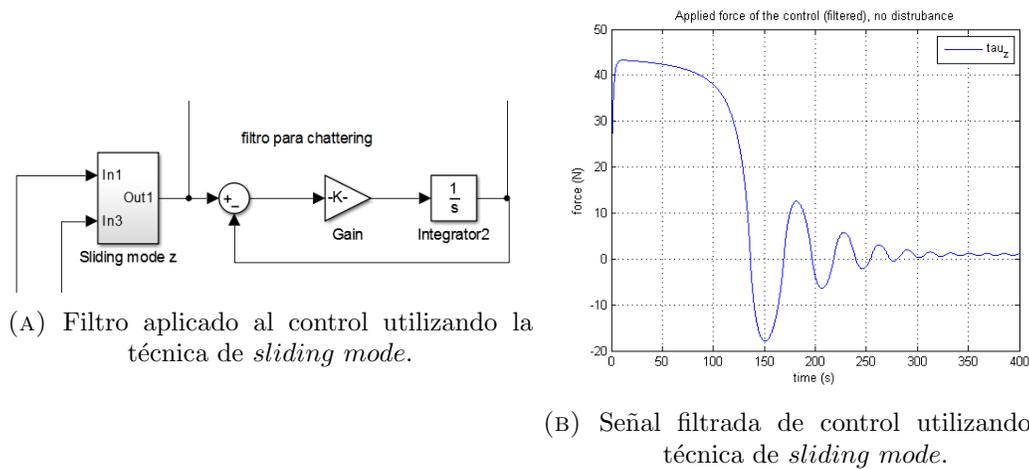


FIGURA 4.3: Señal de control utilizando la técnica de *sliding mode*.

Debido al efecto de *chattering* u oscilación que tiene la señal de salida del control, es necesario filtrarla para disminuir dicha oscilación. Esto es importante porque de lo contrario, los motores se verían afectados severamente por este efecto, dañándolos, disminuyendo su tiempo de vida y afectando su desempeño.



(A) Filtro aplicado al control utilizando la técnica de *sliding mode*.

(B) Señal filtrada de control utilizando la técnica de *sliding mode*.

FIGURA 4.4: Control por *sliding mode*.

4.2. Control PD no lineal para el caso de regulación con compensación de gravedad

Esta sección habla acerca del controlador PD no lineal empleado para el AUV desarrollado en este trabajo. Este método de control es ampliamente usado en sistemas industriales, además ya ha sido probado anteriormente en trabajos que incluyen ROV's y AUV's [9]. Por tal motivo, se considera utilizar este tipo de controlador y demostrar las capacidades que puede llegar a tener el vehículo planteado.

El model del AUV (antes mencionado), es el siguiente:

$$\dot{\eta} = J_{\Theta}(\eta)\nu \quad (4.10)$$

$$M\dot{\nu} + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + w \quad (4.11)$$

Se considera que η y ν son medidas. Definiendo al error como $e = \eta - \eta_d$ y su derivada $\dot{e} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d$:

El controlador PD resultante es:

$$\tau = g(\eta) + J^T(\eta)\tau_{PD} \quad (4.12)$$

en donde:

$$\tau_{PD} = -K_p e - K_d \dot{e} \quad (4.13)$$

con:

$$K_p = K_p^T > 0 \quad (4.14)$$

y

$$K_d = K_d^T > 0 \quad (4.15)$$

El sistema en lazo cerrado, sustituyendo eqA en eqB resulta:

$$M\dot{\nu} + D(\nu)\nu + g(\eta) = g(\eta) + J^T(\eta)[-K_p e - K_d \dot{e}] + w \quad (4.16)$$

Suponiendo que $\eta_d = cte.$:

$$M\dot{\nu} + D(\nu)\nu = -J^T(\eta)K_p e - J^T(\eta)K_d \dot{\eta} + w \quad (4.17)$$

Al sustituir eqX en eqY, considerando $w \approx 0$ y $K_d^* = J^T(\eta)K_d J(\eta)$:

$$M\dot{\nu} + [D(\nu) + K_d^*]\nu = -J^T(\eta)K_p e \quad (4.18)$$

Para probar que el sistema es estable, la función candidata de Lyapunov propuesta es:

$$V = \frac{1}{2}\nu^T M\nu + \frac{1}{2}e^T K_p e \quad (4.19)$$

Como se puede apreciar

$$V > 0 \quad (4.20)$$

y

$$\frac{1}{2}e^T K_p e \rightarrow \infty \text{ a medida que } \|e\| \rightarrow \infty$$

Derivando a V resulta,

$$\dot{V} = \nu^T M\dot{\nu} + \dot{e}^T K_p e \quad (4.21)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior a eqC, con $\eta_d = cte.$:

$$\dot{V} = \nu^T [-(D(\nu) + K_d^*)\nu - J^T(\eta)K_p e] + \dot{\eta}^T K_p e \quad (4.22)$$

La ecuación resultante es:

$$\dot{V} = -\nu^T [D(\nu) + K_d^*]\nu \quad (4.23)$$

Usando el teorema de *Krasovskii – LaSalle*, se puede probar que el sistema con un control PD no lineal, es globalmente asintóticamente estable (GAE) si $J(\eta)$ esta definida para todo η (sin singularidades). Por otra parte, las trayectorias van a converger al conjunto Ω que se encuentra en:

$$\dot{V}(x) = -\nu^T [D(\nu) + K_d^*] \nu \equiv 0 \quad (4.24)$$

lo que es cierto para $\nu = 0$. Por lo tanto,

$$\Omega = (e, \nu) : \nu = 0 \quad (4.25)$$

Ahora, $\nu \equiv 0$ implica que $M\dot{\nu} = -J^T(\eta)K_p e$, el cual es diferente de cero mientras $e \neq 0$. Entonces, el sistema no podrá estar en un punto de equilibrio diferente a $e = 0$. Dado que el punto de equilibrio $(e, \nu) = (0, 0)$ es el conjunto invariante más grande de M en Ω , el punto de equilibrio es GAE de acuerdo con el teorema de *Krasovskii – LaSalle*.

Capítulo 5

Prototipo

5.1. Diseño mecánico

Todo proceso para desarrollar un producto inicia debido a una necesidad. Dicha necesidad exige ciertos requerimientos que el producto debe de cumplir.

Se puede decir entonces, que el diseño de ingeniería es toda actividad necesaria para definir soluciones a problemas específicos que no se han podido resolver con anterioridad, o nuevas soluciones a problemas resueltos de diferente forma.

Las decisiones acerca del material, la geometría de partes, las tolerancias, el acabado de superficies, el agrupamiento de partes y las técnicas de ensamble limitan la cantidad de procesos de manufactura que pueden usarse para hacer una parte determinada.

El diseño virtual del prototipo del AUV se desarrollo en CAD con el software especializado *Solidworks*, en aproximadamente 300HH, por lo tanto, mientras se considere prioritario el proceso de diseño, aumentará la calidad del prototipo. Además, el tiempo que tomará su manufactura y ensamble será menor.

Así mismo, algunos de los factores que se tomaron en cuenta en el proceso de diseño fueron:

- Hidrodinámica.
- Estabilidad en *pitch* y en *roll*.

- Costos.
- Fácil acceso a los componentes internos, suministro de energía y computadoras.
- Estética.
- Materiales.
- Número de ensambles.
- Conexiones internas de cableado.
- Ubicación de componentes.
- Hermeticidad.
- Manufactura.
- Número de ensambles.

Cualquier sistema que dé respuesta a una necesidad humana, debe de ser desarrollado siguiendo el proceso siguiente (figura 5.1):



FIGURA 5.1: Proceso empleado para el diseño del AUV.

5.2. Diseño conceptual.

El primer paso para iniciar el proceso de diseño, es realizar un bosquejo y lluvia de ideas con ayuda de los requerimientos del prototipo. En la figura 5.2 se presentan algunos de los dibujos hechos antes al diseño virtual.

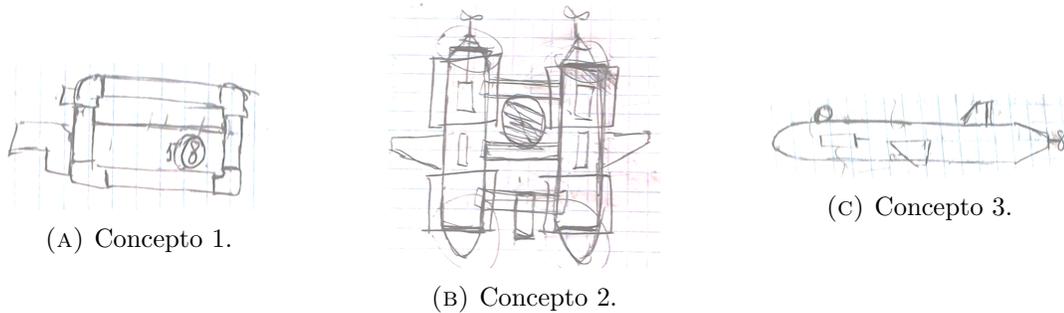


FIGURA 5.2: Diseños previos.

5.3. Diseño virtual.

De manera general, se dibujaron en CAD las características más importantes del submarino. En este punto se logró obtener un modelo matemático suficientemente completo para realizar las simulaciones competentes. Los detalles fueron agregados posteriormente. En la figura 5.3 se muestra la propuesta con las medidas, distribución de tamaño y configuración de motores. En la figura 5.4 se muestra el diseño externo del AUV.

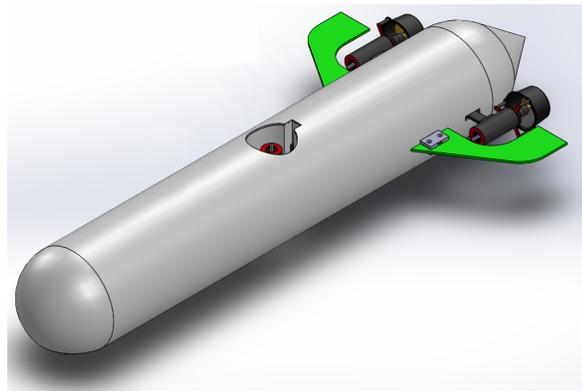
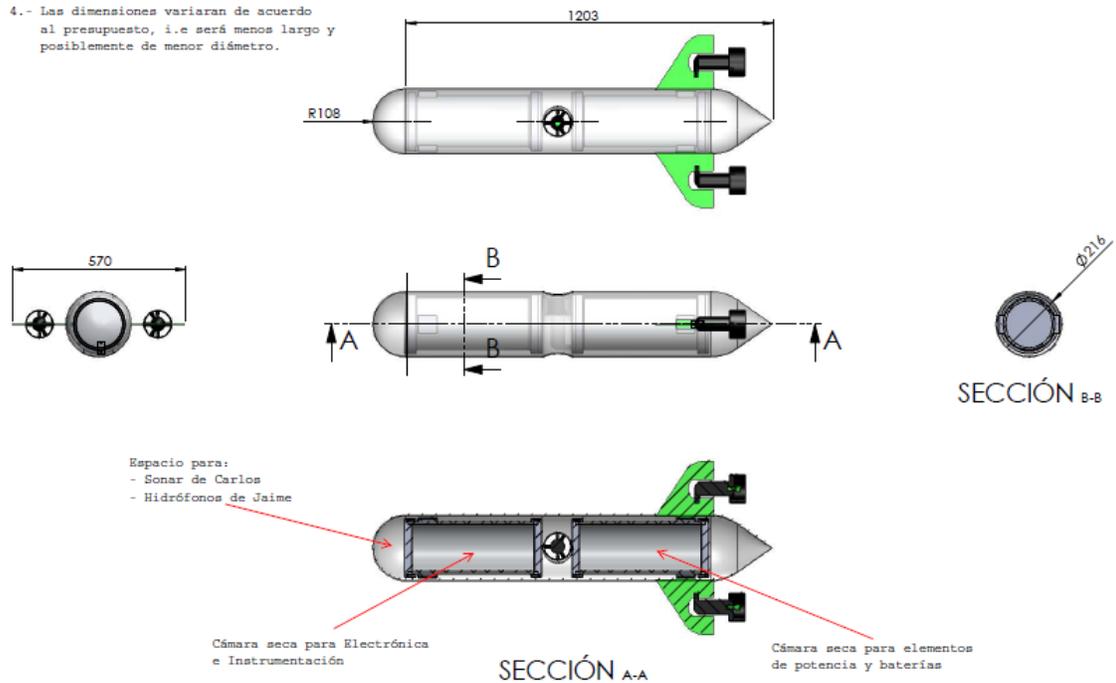


FIGURA 5.3: Diseño virtual del AUV.

- 1.- Dimensiones en mm
- 2.- Emplea 3 propulsores para desplazarse
- 3.- Peso estimado 30 kg en aire.
- 4.- Las dimensiones variaran de acuerdo al presupuesto, i.e será menos largo y posiblemente de menor diámetro.



Subma UMI 2014

FIGURA 5.4: Virtualización del concepto 3.

5.4. Simulación.

Las simulaciones fueron el siguiente paso para verificar el comportamiento deseado. Esto comprobó que el modelo matemático era lo más aproximado al sistema físico esperado. Además, este fue necesario para poder implementar una ley de control. Ver capítulo de modelo matemático en la sección simulación en lazo abierto.

5.5. Diseño detallado.

En esta etapa, se agregaron todas las características que tiene el AUV. Se ajustaron las medidas reales de todas las partes que componen al prototipo. Esto incluye, sensores, electrónica de potencia, alimentación de energía, procesamiento de señales, motores, cableado, etc.

En la figura 5.5 se muestran las vistas frontal y lateral del prototipo con sus componentes internos.

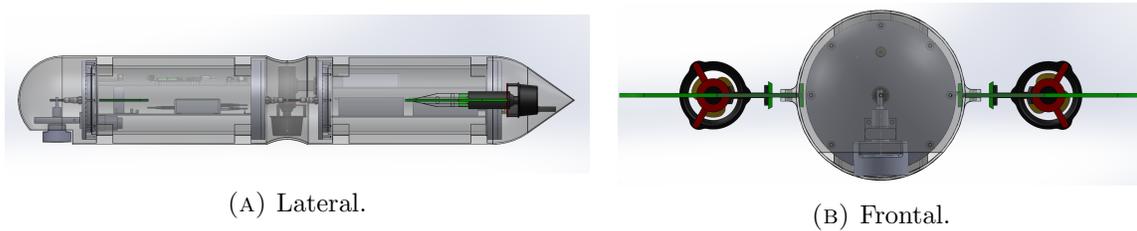


FIGURA 5.5: Dibujo del AUV en CAD.

También en la figura 5.6 se muestra el diseño terminado y el estudio de flujo laminar.

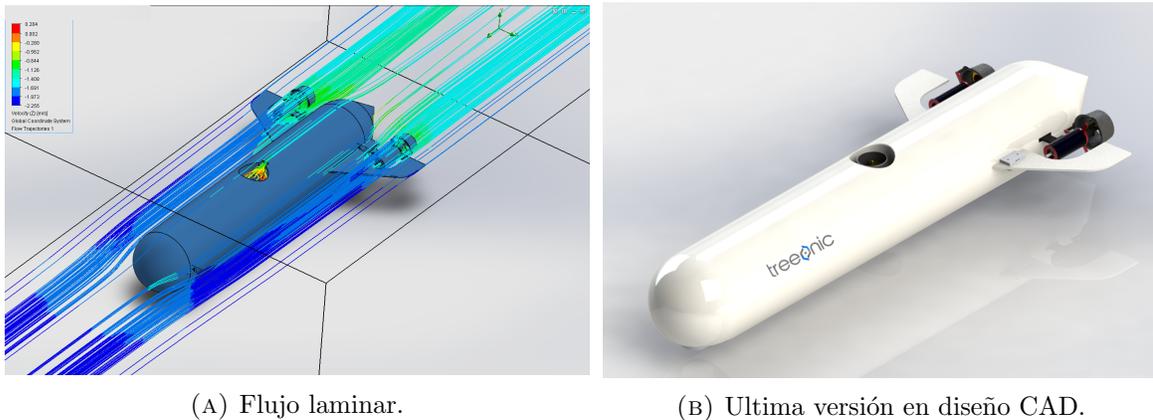


FIGURA 5.6: Dibujo CAD.

Por ultimo en la figura 5.7 se muestra el diseño detallado en CAD con todas las partes del AUV.

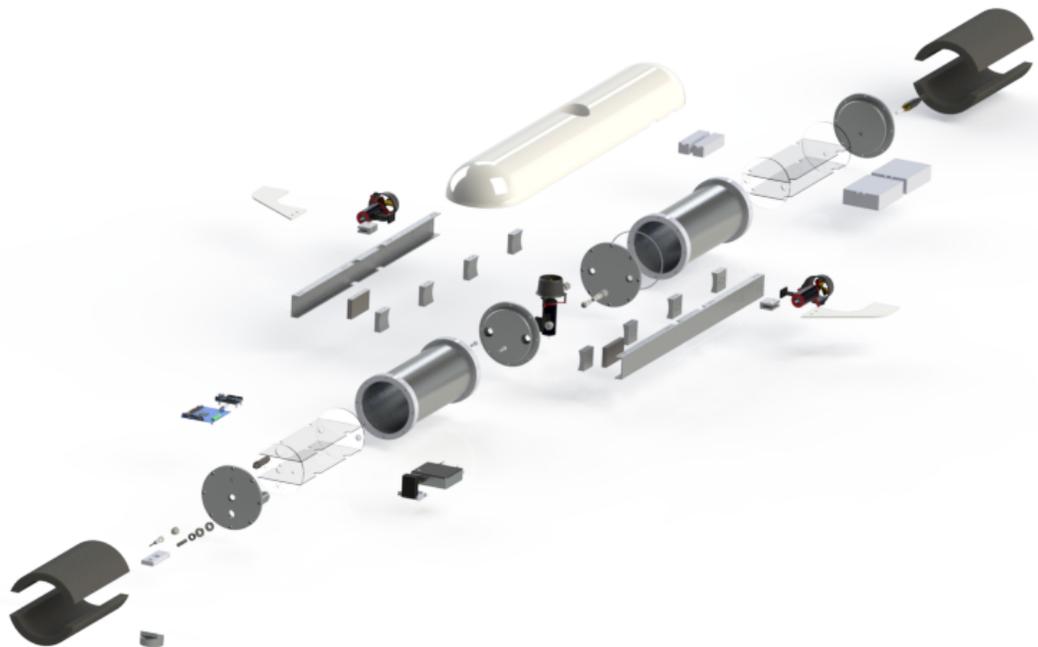


FIGURA 5.7: Diseño CAD detallado con todas sus piezas.

5.6. Fabricación.

La manufactura y el ensamble se hicieron una vez que se obtuvo el diseño virtual final. Posteriormente se hicieron pruebas que retroalimentaron y permitieron hacerle ajustes al prototipo.

El material con el que se contaba antes de iniciar la manufactura del vehículo eran dos tubos de 76cm de largo y $19,2\text{cm}$ de diámetro, con dos bridas (una en cada tubo) colocadas en uno de los extremos, figura 5.8b. Estos se cortaron para que cada uno midiera 40cm de largo y se ajustaron los barrenos de las bridas para colocar tornillos de $0,47625\text{cm}$ ($3/16''$), figura 5.8a. Un par de bridas más se manufacturaron, para el extremo de cada tubo, se soldaron y barrenaron a una medida de $0,47625\text{cm}$ ($3/16''$), estas se muestran en las figuras 5.9a y 5.9b.

Una vez terminado el proceso de manufactura de cada tubo con sus bridas, se manufacturaron las cuatro tapas que proporcionan hermeticidad a los cilindros. Estas tapas se muestran en la figura 5.10. A la par, se manufacturaron las bases para los componentes electrónicos y baterías que están hechas con acrílico cortado a láser.



(A)



(B)

FIGURA 5.8: Manufactura de cilindros.



(A)



(B)

FIGURA 5.9: Manufactura de bridas.

Se fabricaron los perfiles que le dieron la estructura rígida a los cilindros, estos se muestran en la figura 5.11. Finalmente, se fabricó la carcasa del AUV con fibra de vidrio.

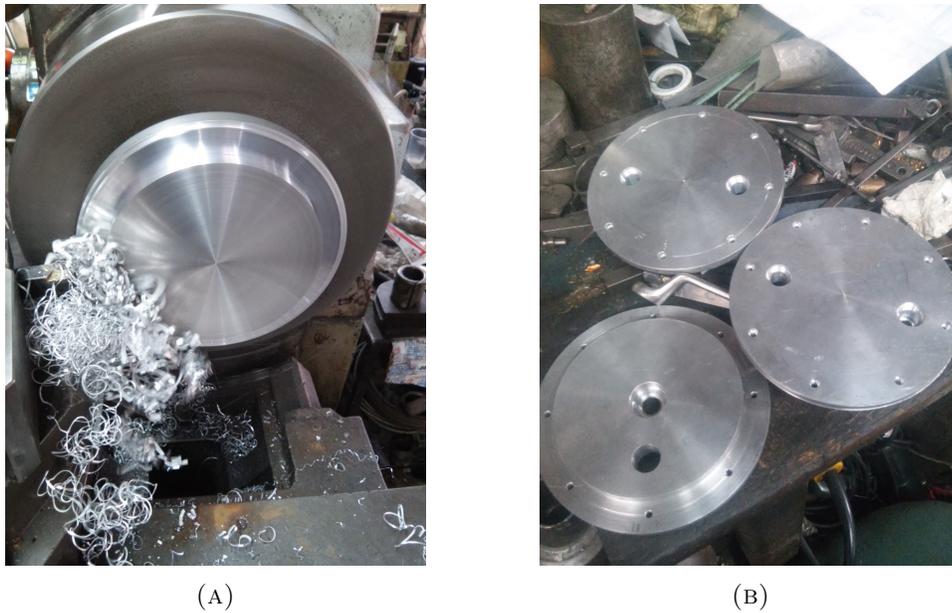


FIGURA 5.10: Manufactura de tapas.

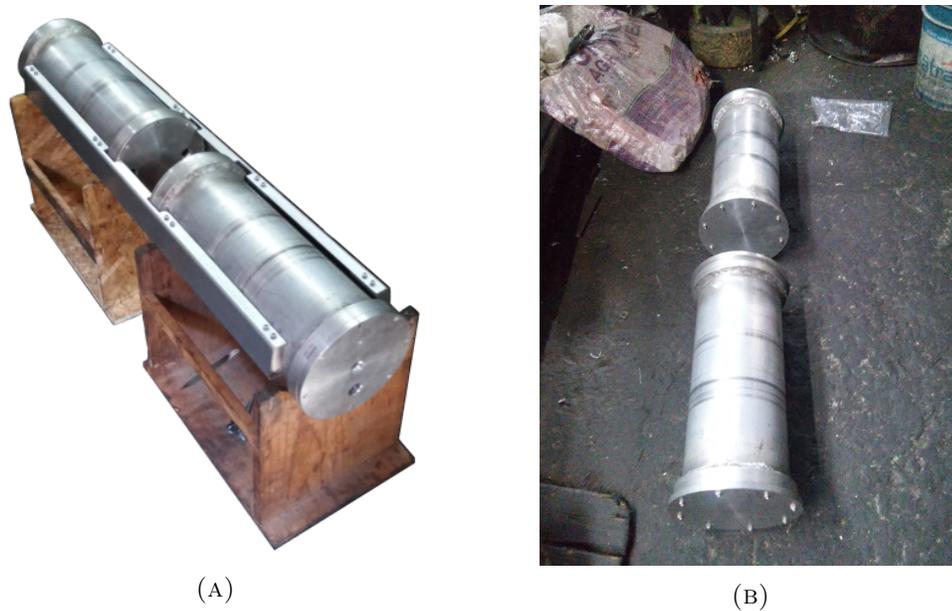


FIGURA 5.11: Estructura con los cilindros.

5.7. Diseño electrónico.

La estructura mecánica del AUV es determinante para la hidrodinámica del mismo, sin embargo, para que este sea funcional fue necesario el diseño electrónico, el cual se describe en esta sección. El prototipo está compuesto de diversas partes como se muestra en la figura 5.12, donde se puede observar el diagrama de las principales secciones que lo componen.

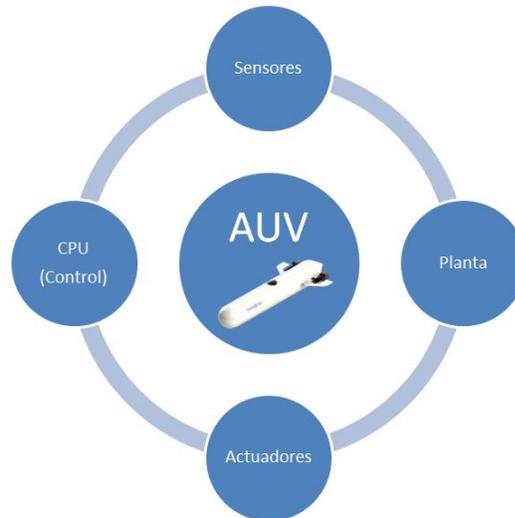


FIGURA 5.12: Diagrama del diseño del AUV.

5.7.1. Arquitectura electrónica.

Los componentes electrónicos que se necesitan para tener un prototipo funcional son: computadora central, sensores, baterías, motores, controladores de motores y tarjetas de comunicación. En las figuras 5.14 y 5.13 se muestran en detalle las conexiones internas del AUV.

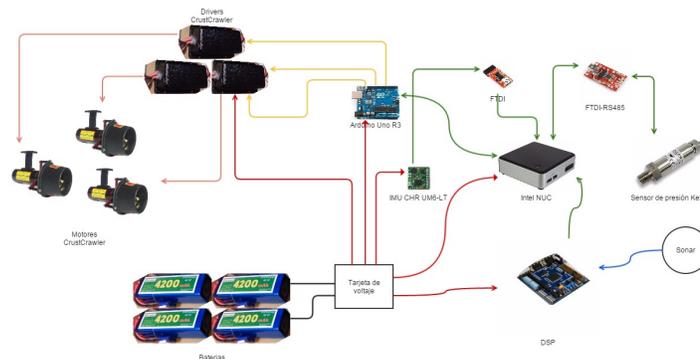


FIGURA 5.13: Arquitectura de conexiones electrónicas del AUV.

5.7.2. Procesamiento.

5.7.2.1. Intel NUC y ROS.

La unidad de procesamiento usada en el submarino es la computadora *Intel NUC* que se muestra en la figura 5.15, cuenta con un procesador *core i5* suficiente para esta aplicación.

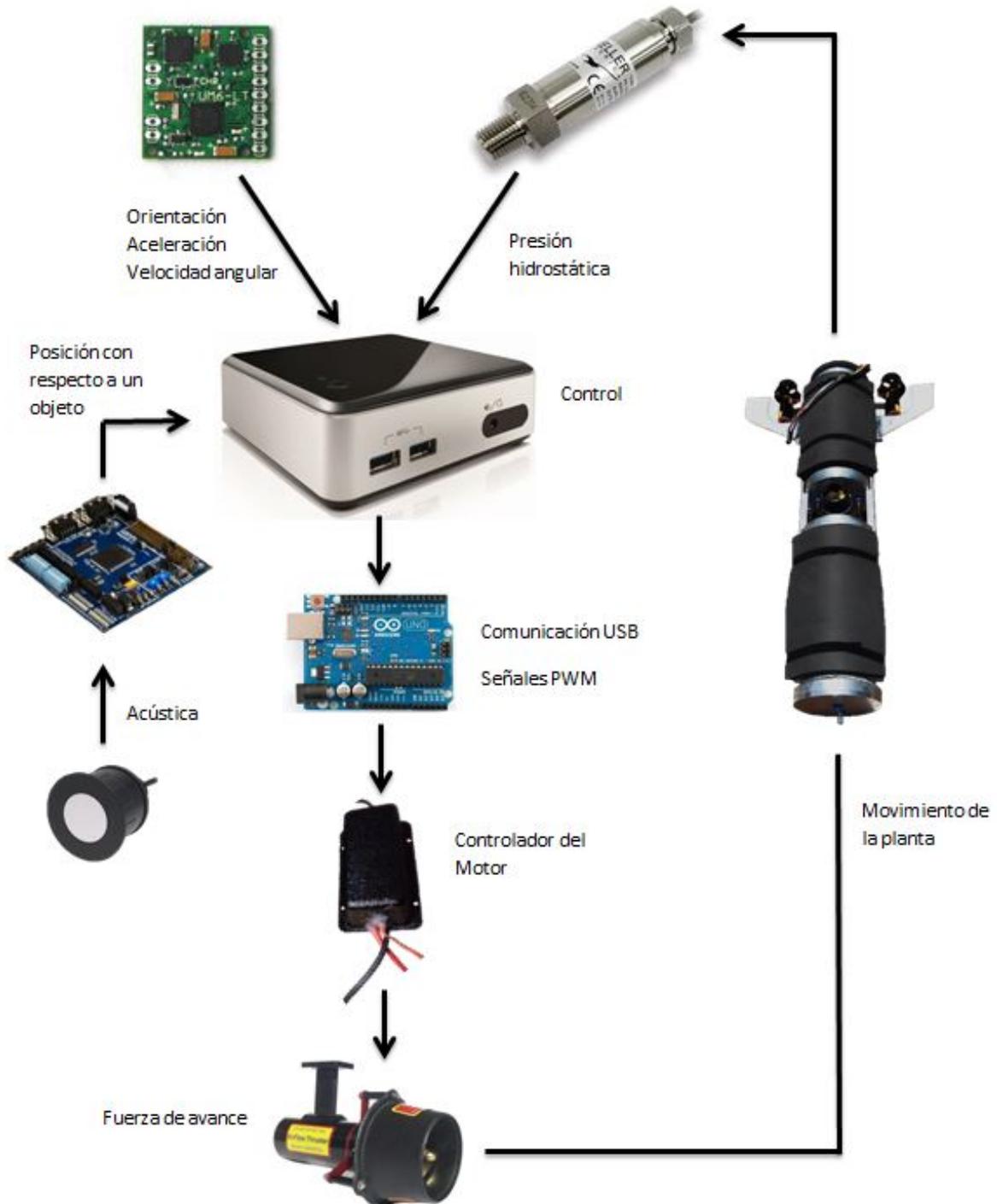


FIGURA 5.14: Arquitectura electrónica del AUV.

Cuenta con el sistema operativo *Ubuntu 12,04* de *Linux* en el cual está instalado ROS para la compilación de códigos de adquisición de datos y de control del vehículo [12]. El ROS es un sistema operativo para robots utilizado por grandes empresas como ABB Yaskawa y

motoman, cuenta con una comunidad muy grande de desarrollo que fomenta el código abierto, es posible utilizar este sistema en aplicaciones civiles y militares siempre y cuando cuente con seguridad de software, este software también permite hacer simulaciones 3d y cuenta con muchas herramientas de desarrollo.



FIGURA 5.15: CPU Intel NUC.

Por medio de interconexiones de nodos de ROS se logro hacer funcionar la adquisición de datos de los sensores, computar el control y mandar las señales necesarias a los actuadores respectivamente. Esto consistió en programar en *c++* nodos que contienen la programación del control y la publicación de datos.

Los datos obtenidos de la intercomunicación entre nodos permitieron el procesamiento funcional del vehículo. En la figura 5.16 se muestra la arquitectura de conexiones de nodos ROS.

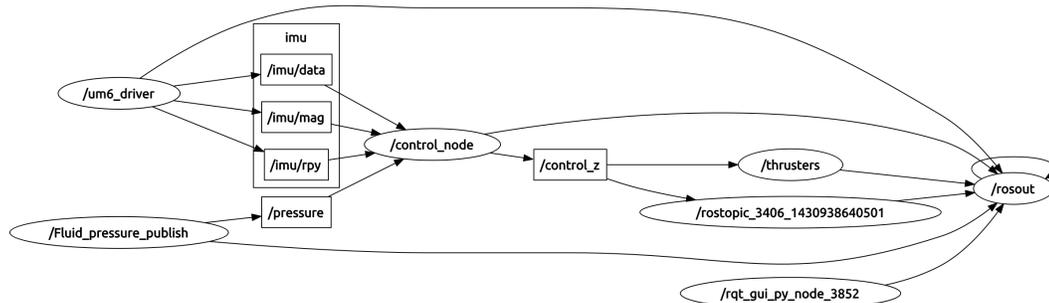


FIGURA 5.16: Esquema de nodos de ROS.

5.7.2.2. DSP

Para el procesamiento de la señal proveniente del sonar se utilizará el DSP ONIK. Este se encargara de procesar la señal para determinar cual es la posición que se desea seguir y envía los datos a la computadora para ser usado por el control. De esta manera podría

navegar respecto a un o varios puntos. En la figura 5.17 se muestra la tarjeta embarcada en el prototipo para el tratamiento de señales acústicas.



FIGURA 5.17: Procesador digital de señales ONIK.

5.7.3. Sensores.

5.7.3.1. IMU MicroStrain 3DM-GX1

Esta central inercial es de las mejores que hay en el mercado y es usada en otros equipos de AUV a nivel internacional, sin embargo, su costo es muy elevado. En este trabajo solo se desarrollaron programas y circuitos electrónicos para poder ser implementada en el AUV pero no se utilizó en el vehículo. Algunas características que tiene son:

- 1495 USD, aprox. 1140 Euros.
- Procesamiento embarcado/filtros del acelerómetro, salidas del giroscopio y magnetómetro..
- Compensador de temperatura.
- Se puede calibrar una desalineación del giroscopio y el magnetómetro.
- Salidas de ángulos de Euler, cuaterniones y matriz de orientación.
- Comunicación RS-232, RS-485 y opciones de salidas analógicas.
- Pequeña, de bajo peso y de bajo consumo.
- Actualización de datos a 350 Hz.

En la figura 5.18 se muestra la imagen de la central inercial, y en la figura 5.19 se muestra la gráfica de datos mediante el programa implementado en ROS.



FIGURA 5.18: IMU MicroStrain 3DM-GX1.

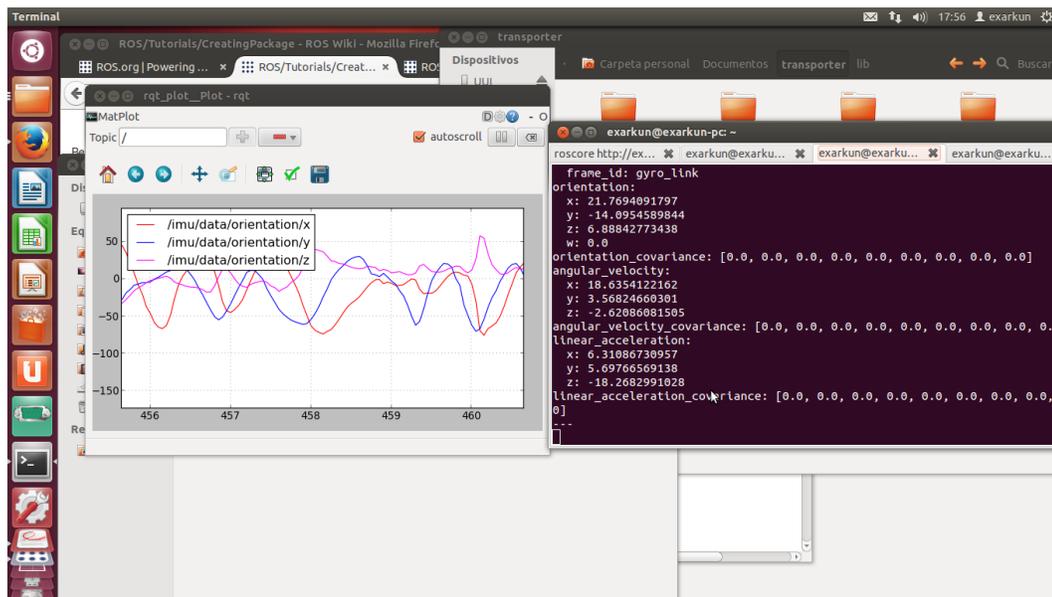


FIGURA 5.19: Gráfica de datos de la IMU MicroStrain 3DM-GX1 en ROS.

5.7.3.2. IMU CHR6-LT.

Esta central inercial es la que se utilizó en el prototipo. Se desarrollaron los programas y los circuitos necesarios para que entregara los datos de velocidad de las variables, además de la posición en *yaw*. En la figura 5.20 se muestra la central inercial.

Estas son algunas de sus características.

- 149.95 USD, aprox. 123.5 Euros
- 10 veces mas barata que la Microstrain, 3dm-gx1.
- Salida de angulos de Euler y Cuaterniones..



FIGURA 5.20: IMU CHR6-LT.

- Calibración automática del Gyro..
- Salidas seriales ajustables (20 Hz - 300 Hz) con velocidad de hasta 115200 buadios.
- Comunicación UART.
- *Open-source firmware* con herramientas de desarrollo gratis.
- *Open-source PC software* para visualizar datos.

5.7.3.3. Sensor de presión BMP085.

Este sensor de presión es de bajo costo y no es específico para trabajar en el agua, está hecho para funcionar en el aire y no es el que se implementó en el prototipo, pero se desarrolló lo necesario para hacerlo funcionar con ROS a modo de prueba para entender mejor el funcionamiento de los sensores.

Algunas de sus características son:

- 350 MXN, aprox. 20.5 Euros.
- Salida de datos digitales.
- Medición de presión del aire.
- Comunicación I2C.
- Medición de presión relativa.



FIGURA 5.21: Sensor de presión BMP085.

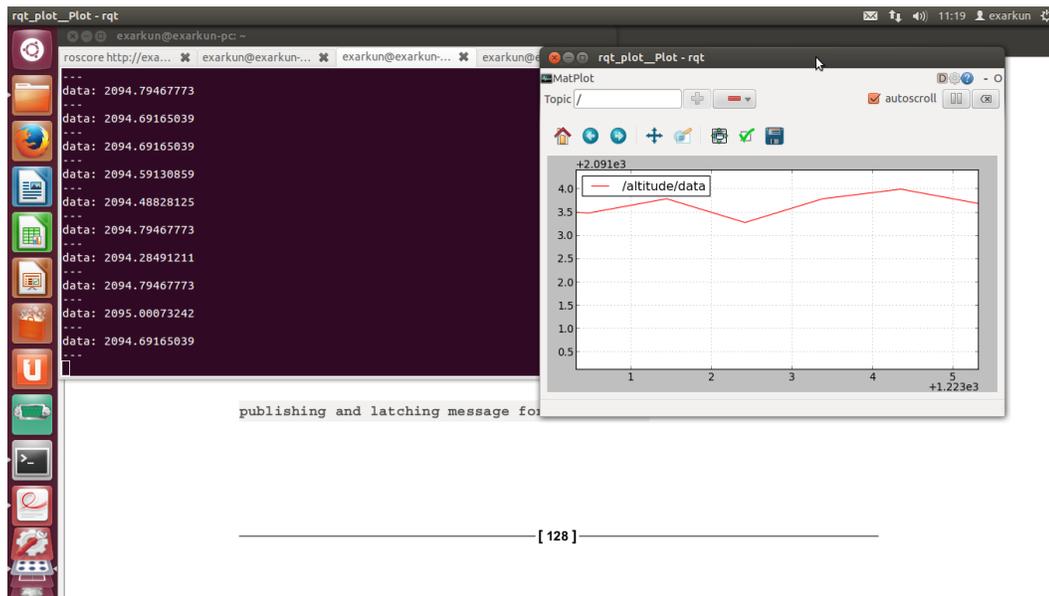


FIGURA 5.22: Gráfica con los datos del sensor de presión BMP085.

Esta ecuación es la que describe su comportamiento en el aire y esta optimizado para ella.

$$P = P_b(T_b/(T_b + L_b(h - h_b)))^{g(M)/R^*(L_b)}$$

En la figura 5.21 se muestra la imagen del sensor, mientras que en la figura 5.22 se muestra la gráfica de los datos en ROS.

5.7.3.4. Sensor de presión Keller.

Este es el sensor de presión implementado en el vehículo. Es específico para funcionar con agua y la forma en la que se implementa en el prototipo permite una mejor medición, además

de que ayuda a la hermeticidad. En la figura 5.23 se muestra dicho sensor.



FIGURA 5.23: Sensor de presión Keller.

Estas son algunas características del sensor de presión Keller:

- Comunicación RS-485 (Se requiere inicialización).
- Sensor piezo-resistivo.
- Especifico para trabajar en agua.
- Rango de medición. 0 - 500 psia o 34.47 bares
- Resolución de 0.002 % FS 0.01 psia o 0.07 cm
- Precisión 0.25 % FS TEB
- Utiliza el protocolo de comunicación IEEE754 de 32 bits (Para transferir datos de medición).
- Puede resistir una profundidad de hasta 340 m.

Esta es la ecuación de los datos obtenidos del sensor de presión.

$$P - P_0 = \rho gh$$

En la figura 5.24 se muestran las gráficas del sensor funcionando en el sistema ROS, y en la figura 5.25 se muestra el primer experimento que se realizó con el sensor de presión en una alberca, este se mantuvo por un tiempo determinado a una profundidad deseada.

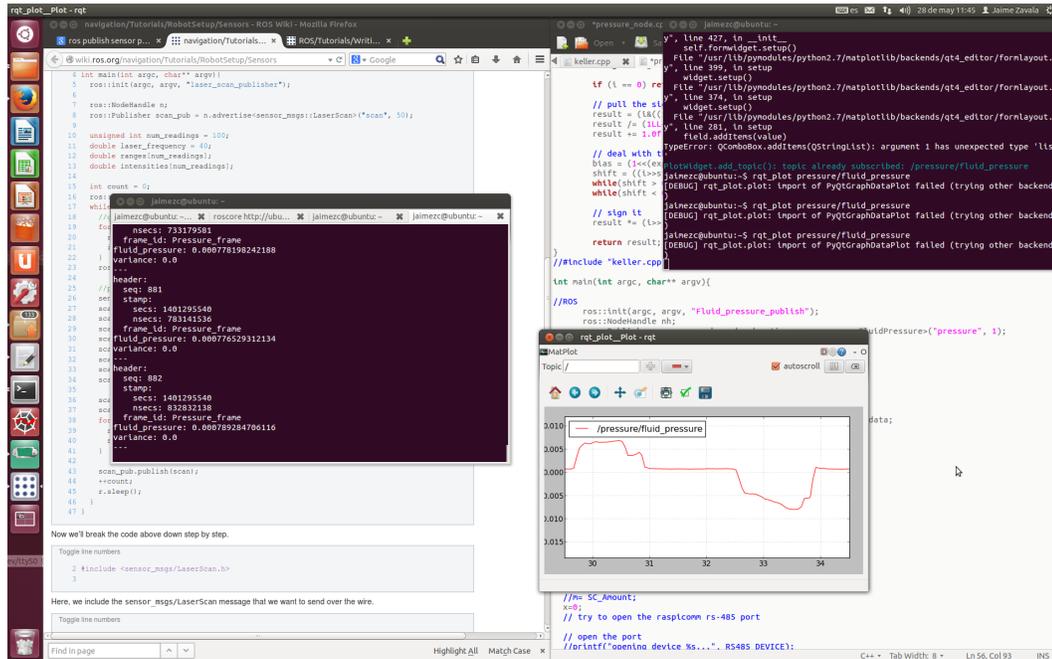


FIGURA 5.24: Gráfica de los datos del sensor de presión keller (ROS).

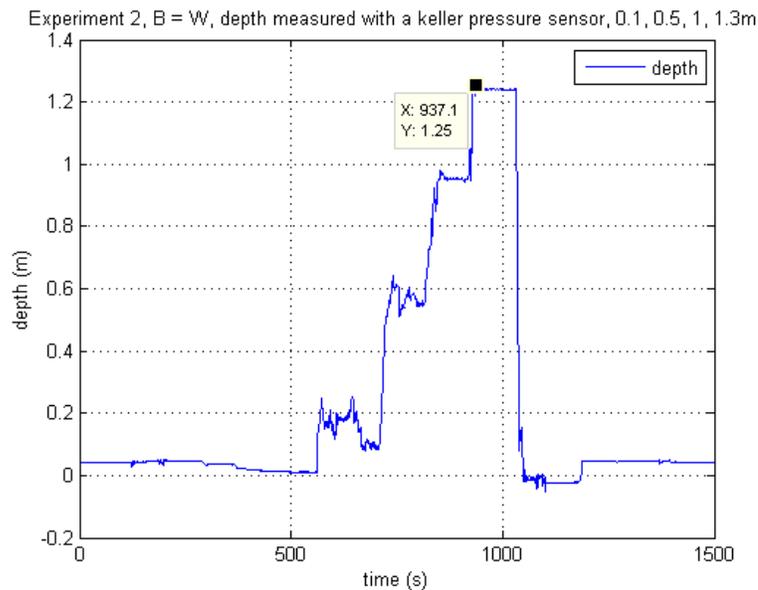


FIGURA 5.25: Gráfica con los datos del primer experimento con el sensor keller en una alberca.

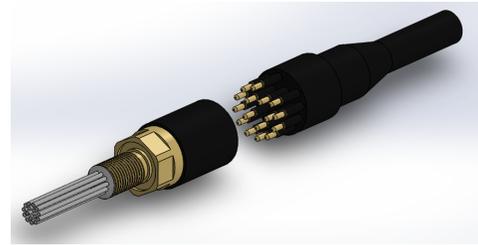
5.7.4. Comunicaciones.

5.7.4.1. Conectores.

Los conectores que se utilizaron en el prototipo son los *bulgin*, propios para la alimentación y la transmisión de datos entre cilindros y los *seacon* utilizados para conectar los motores con el interior del cilindro de potencia. En la figura 5.26 se muestran dichos conectores.



(A) Conector para agua *Bulgin*.



(B) Conector para agua *Seacon*

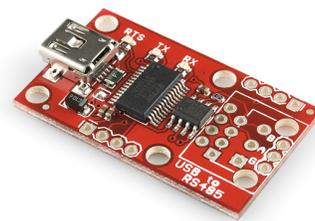
FIGURA 5.26: Conectores.

5.7.4.2. FTDI y Convertidor RS-485.

Las comunicaciones seriales son fundamentales en nuestro prototipo ya que con ellas adquirimos los datos de los sensores, en este caso ocupamos comunicación serial RS-232 y RS-485. La central inercial envía datos *UART* y para ser recibidos por la computadora se necesita el FTDI que se muestra en la figura 5.27a. Por otro lado el sensor de presión envía datos a través de comunicación RS-485 por lo que se tiene que utilizar el convertidor. Figura 5.27b.



(A) FTDI RS-232.



(B) FTDI RS-485.

FIGURA 5.27: Conectores.

5.7.4.3. Microcontrolador.

Se utiliza un microcontrolador *AVR* en la placa arduino uno. Este se encarga de recibir las salidas de control y generar el *PWM* que arma los motores y controla la fuerza de los mismos. Este componente se muestra en la figura 5.28.



FIGURA 5.28: Arduino uno R3.

5.7.5. Potencia.

5.7.5.1. Motores.

Los motores *Crustcrawler* que se muestran en la figura 5.29 son los actuadores de nuestro sistema. Hacen actuar al control estabilizando el vehículo. Estos motores tienen una fuerza de 62 *N*.



FIGURA 5.29: Motores *Crustcrawler*.

5.7.5.2. Controladores de motores.

Los controladores de motores de la figura 5.30 se encargan de enviar el voltaje a los motores para que apliquen una fuerza deseada. Estos tienen la característica de hacer que los motores giren hacia ambos lados, lo cual permite un mejor control de *yaw* además de poder tener reversa.



FIGURA 5.30: Controlador de motor.

5.7.5.3. Baterías.

Las baterías que alimentan el sistemas son de dos tipos diferentes, estas se detallan a continuación. En el cuadro 5.1 y 5.2 se muestra el desglose del consumo de cada componente del AUV.

CUADRO 5.1: Cálculo de potencia para el compartimento 1

Dispositivo	Vdd (máx.) [V]	Idd (máx.) [A]	Potencia (máx.) [W]	
1	IMU UM6-LT	5.0	0.058	0.29
2	Intel NUC	19.0	3.42	65
3	Tarjeta ONIK	5.0	0.5	2.5
4	Arduino One	5.0	0.5	2.5
5	Sensor de presión Keller	28.0	0.05	0.84
6	FTDI	5.0	0.09	0.5

Factor de seguridad $k = 1,5$

La potencia total P_{1T} para el compartimento 1 resulta: $P_{1T} = 71,63W * k = 107,5W$

Las dos baterías para el compartimento 1 son de 14.8V @ 4.2Ah, la potencia que pueden suministrar ambas baterías es de 124.32Wh.

Por lo tanto, realizando las operaciones correspondientes, la duración de ambas baterías para el compartimento 1 es de 1hr 9min 23s a máxima potencia.

CUADRO 5.2: Cálculo de potencia para el compartimento 2

Dispositivo		Vdd (máx.) [V]	Idd (máx.) [A]	Potencia (máx.) [W]
1	Motor Crustcrawler	24.0	5.26	130
2	Motor con encoder	12.0	5.0	60

La potencia total P_{2T} para el compartimento 2 resulta: $P_{2T} = 450W$

Las dos baterías para el compartimento 1 son de 22.2V @ 11.0Ah cada una; la potencia que pueden suministrar ambas baterías es de 488,4Wh

Por lo tanto, realizando las operaciones correspondientes, la duración de ambas baterías para el compartimento 2 es de 1hr 5min 7s a máxima potencia, pero sin tomar en cuenta un factor de seguridad.

Con lo que a máxima potencia, los dos motores que dan impulso al submarino pueden dotarlo con una velocidad de hasta 11,98km/hr, por otro lado, restringimos la potencia de los motores al 20% por seguridad y para hacer pruebas y con esta configuración puede durar hasta 7 horas en operación.

Capítulo 6

Sonar

6.1. Diseño conceptual.

La figura 6.1 representa el primer paso para desarrollar un sistema de prueba, el sonar. Se espera que este sistema trabaje a 348e giro; se usa una tarjeta de desarrollo de ONIK con un DSP de texas instruments (TMS320f28335) para lograr el objetivo.

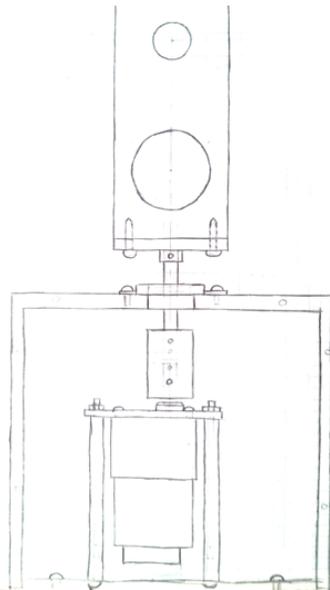


FIGURA 6.1: Bosquejo del sonar de aire.

6.2. Diseño virtual/Diseño detallado.

Antes de fabricar este pequeño sistema, fue necesario hacer un diseño en CAD, ya que no contiene gran cantidad de piezas, solo fue suficiente un paso para tener el dibujo en 3D y no fue necesario hacer una simulación del comportamiento de este sistema, por solo ser un sistema de prueba muy básico.

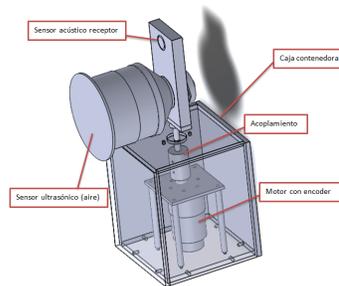


FIGURA 6.2: Dibujo CAD del sonar.

6.3. Fabricación.

El paso de fabricación fue simple y rápido. Ya que desde un principio se buscó en el diseño en CAD, que fuera un sistema simple, pero funcional. Un problema que se tiene con este sistema es que le falta una base más ancha para soportar el movimiento y peso del sensor acústico, o cambiar el soporte del sensor y poner el centro de gravedad del sensor colineal con el eje de giro del motor.

En la figura 6.3 (página siguiente) se puede apreciar la rotación del sensor acústico para aire, movimiento que se busca tendrá el sensor acústico sumergible.

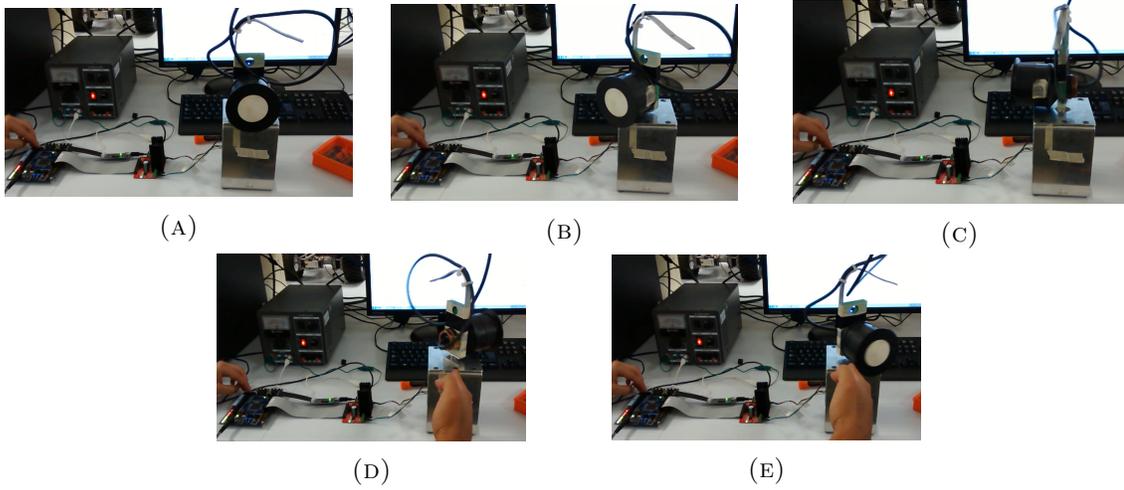


FIGURA 6.3: Movimiento del sonar.

Capítulo 7

Resultados y conclusiones.

7.1. AUV Sx-1013.

El diseño del prototipo AUV Sx-1013 que se construyó para este trabajo de tesis se desarrolló en conjunto con el Ing. Jaime Zavala Cetina y el Dr. Iván Torres Tamanaja, cuenta con 4 grados de libertad (DOF, por sus siglas en inglés *Degrees Of Freedom*) en *heave*, *surge*, *yaw* y *sway*, su diseño se considera hidrodinámico (considerando los coeficientes de *drag* o arrastre y el área transversal que entra en contacto perpendicularmente con el desplazamiento del AUV)[4], cuenta con una central inercial y un sensor de presión para la navegación, esta equipado con un sonar en la punta, cuenta con una computadora embebida para el cálculo de algoritmos de control y lectura de sensores, véase figura 7.1 .

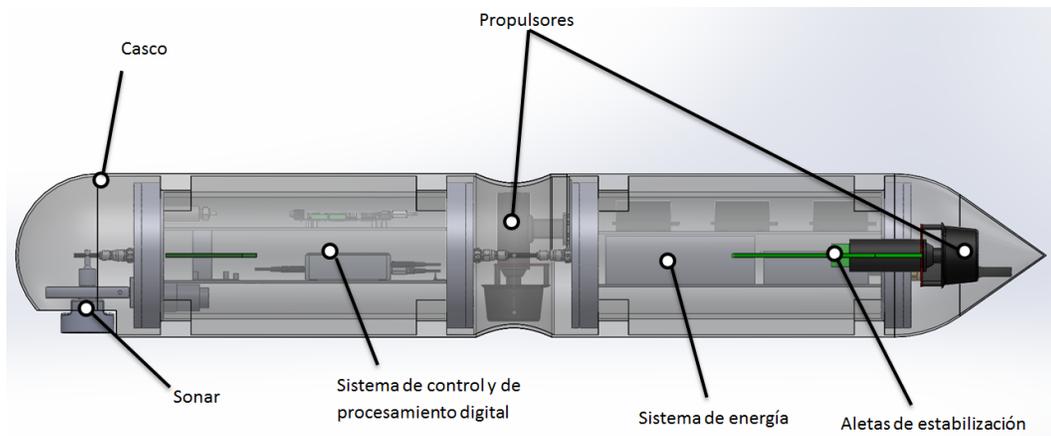


FIGURA 7.1: Componentes principales del Sx-1013.

Su configuración es de 3 motores, con los que se puede controlar *yaw* (ψ), *surge* (u) y *heave* (w) ver figura 7.2.

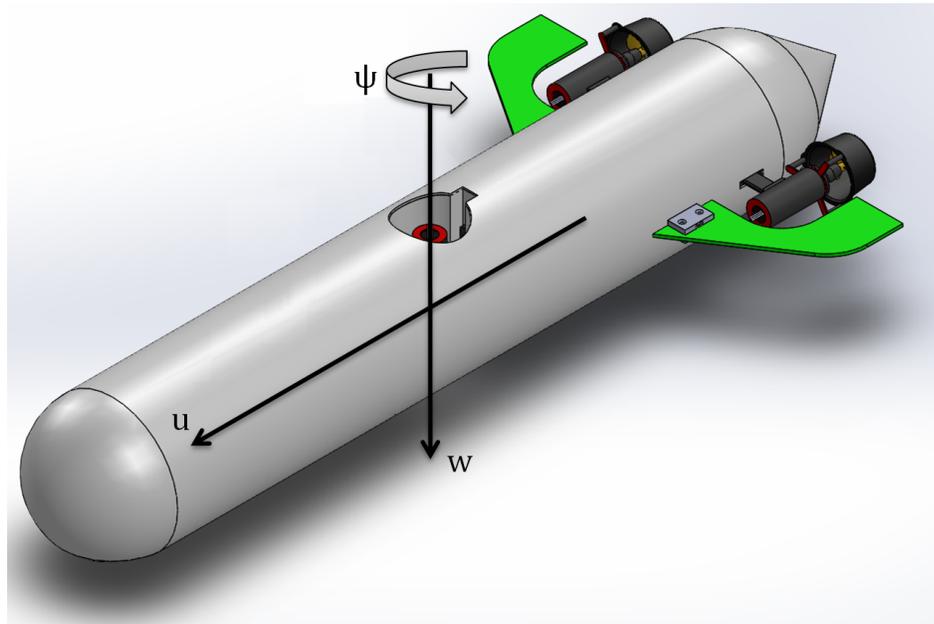


FIGURA 7.2: Ejes de movimiento del Sx-1013.

Este esta dividido en dos cilindros (compartimientos secos), uno de ellos contiene la electrónica, los sensores y las unidades de procesamiento, mientras que en el otro se encuentran las baterías y la etapa de potencia para los motores. En la figura 7.3a se muestra el interior del primer compartimento y en la figura 7.3b se observa el interior del compartimento de potencia.



(A) Compartimento de control y electrónica.



(B) Compartimento de potencia.

FIGURA 7.3: Manufactura de bridas.

El prototipo lleva unas placas de *FOAMI* de 1 pulgada de ancho para darle flotabilidad al vehículo, este material solo absorbe el 1% de agua por lo que la variación de la flotabilidad no afecta su estabilidad, aunque debe tomarse en cuenta que para profundidades mayores (100m en adelante), el material empieza a comprimirse y empieza a perderse la flotabilidad; una solución a este problema es el uso de *SynFoam LG*, por ejemplo. En la figura 7.4 se muestra el prototipo final con el que se realizaron las pruebas.



FIGURA 7.4: AUV Sx-1013 completo y funcional.

Se fabricó una carcasa de fibra de vidrio para mejorar la hidrodinámica del vehículo, posteriormente ayudará a mejorar su estética, además tiene como propósito proteger al sensor acústico (SONAR). La carcasa esta hecha puramente de resina y fibra de vidrio para darle mayor flexibilidad, es decir, no tiene un material extra (alma) que le daría mayor rigidez. En la figura 7.5 se muestra el prototipo terminado con la carcasa de fibra de vidrio.



FIGURA 7.5: Prototipo Sx-1013 con carcasa.

7.2. Experimentos.

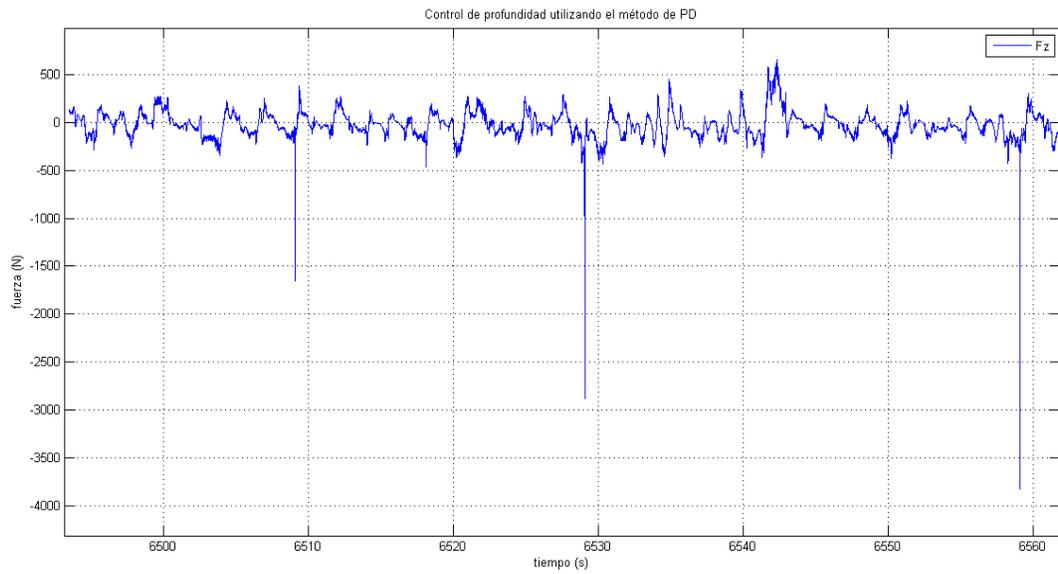
Se implementó un control PD no lineal en el submarino para controlar z (profundidad) y ψ (yaw), y de esta manera estabilizarlo a una profundidad y orientación deseada.

En la figura 7.6, demuestra que el submarino es estable para el ángulo de $pitch$ y de $roll$. Además, en el experimento se puede apreciar que la profundidad deseada se mantiene.

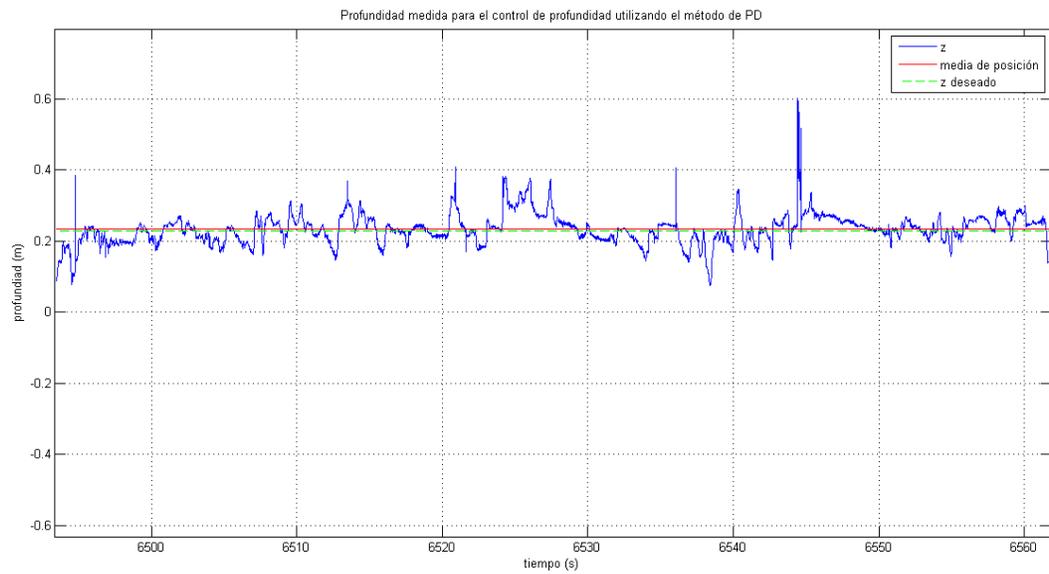


FIGURA 7.6: Profundidad deseada.

En la figura 7.7 (gráfica del experimento de la figura 7.6) se observa el comportamiento del control que mantiene al vehículo a una velocidad deseada cerca del cero y con una profundidad deseada.

FIGURA 7.7: Control PD en z .

En la figura 7.8 se puede apreciar la profundidad del vehículo durante una prueba real, se puede observar que el control lo mantiene cerca de la profundidad deseada.

FIGURA 7.8: Gráfica de la profundidad del AUV con PD .

En la figura 7.9 se observa la velocidad angular en *yaw* en donde el control la mantiene cerca de la velocidad deseada que es 0.

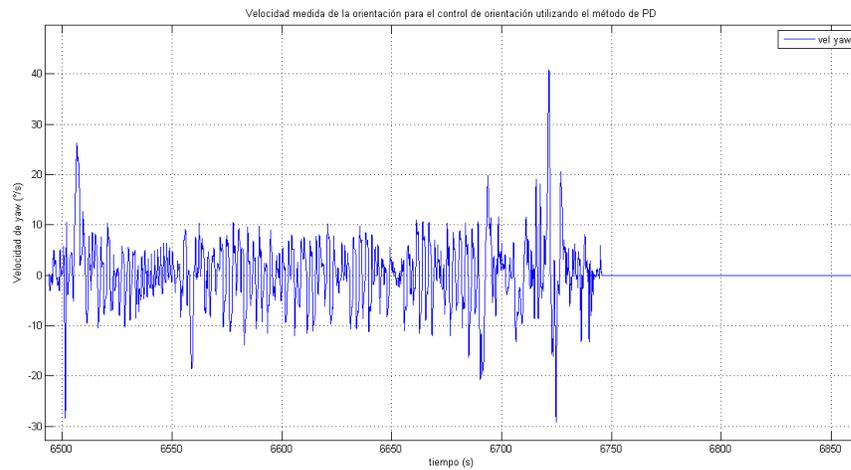


FIGURA 7.9: Velocidad angular en yaw con *PD*.

En la figura 7.10 se muestra el control de *PD* para *yaw*, en esta gráfica se puede ver como está al contrario de la gráfica de velocidad lo que quiere decir que intenta compensarla, y el control al estar cerca del 0 se sabe que intenta que el error siempre permanezca cercano a 0.

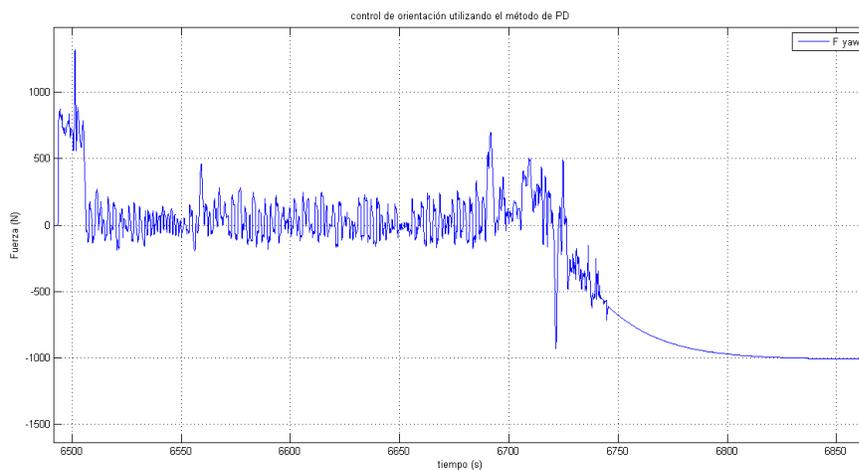


FIGURA 7.10: Control *PD* en *yaw*.

En la figura 7.11 se observa el comportamiento del ángulo *yaw* durante la prueba.

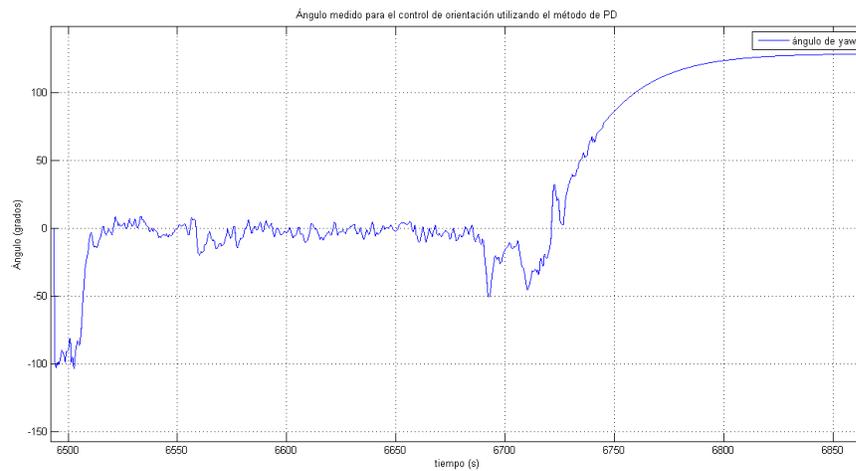


FIGURA 7.11: Orientación en *yaw* con *PD*.

En la figura 7.13 se muestra como el submarino apuntaba a 0 grados en *yaw* (véase figura 7.12), lo que corresponde al norte magnético es decir, el sur de la tierra. Siendo este el comportamiento deseado.

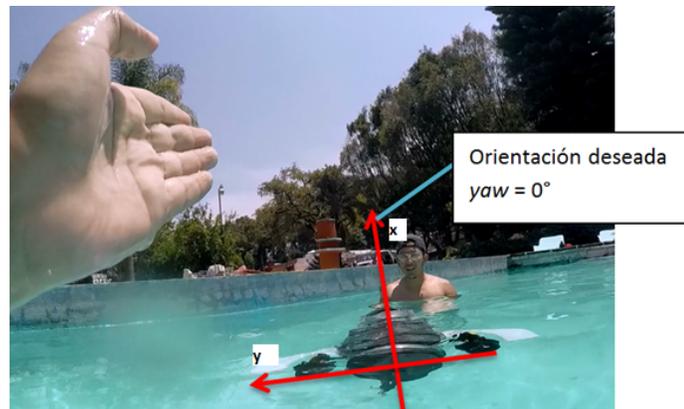


FIGURA 7.12: AUV con una orientación de *yaw* a cero grados

La vista superior de la figura 7.12 es la figura 7.13, donde se puede ver (con ayuda de la vista satelital de Google Maps) que el submarino apunta al norte magnético terrestre (polo sur terrestre):



FIGURA 7.13

7.3. Conclusiones y Perspectivas

Conclusiones.

El uso de un AUV es de gran importancia para la resolución de problemas en áreas específicas, por lo que se considera promisorio el desarrollo y la mejora de este trabajo, para que algún día sea usado y considerado como producto final. Los resultados obtenidos nos demuestran que el método de control PD no lineal empleado, es suficiente para estabilizar al Sx-1013 en un punto deseado, a pesar de las suposiciones teóricas con falta de exactitud, lo que demuestra que el control es robusto para compensar dichas variaciones (de sensado, control, modelado y mecánica). Es imperativo corroborar la estabilidad del sistema con el control propuesto (Lyapunov) para demostrar teóricamente que el sistema se comportará como se desea, complementandolo con la parte experimental.

Trabajar con ROS fue crítico en el desarrollo de *software* del AUV, ya que gracias a sus librerías, soporte y entorno, el tiempo de implementación fue reducido, fue intuitivo, además de eficaz. Se puede decir que es recomendable su uso para trabajos posteriores por las ventajas antes mencionadas incluyendo que es usado a nivel mundial por diversos desarrolladores de *software* en robótica.

Mecánicamente, el AUV necesita de muchas mejoras, en cuando a tamaño, proceso de ensamble, materiales, forma interna de los soportes, etc.

Las pruebas iniciales de hermeticidad fueron cruciales para asegurar que en las pruebas finales no hubiera filtraciones.

Es muy importante planificar cada paso de cada prueba para la experimentación, ya que con esto se asegura un proceso limpio y claro, que mejorará la comprensión y análisis de los resultados.

Se espera que más adelante, se implemente de forma práctica, el uso de sonar para el seguimiento de ductos submarinos.

Perspectivas.

- Mejorar el diseño en cuanto a proceso de ensamble.
- Implementar el sistema de sonar.
- Implementar el seguimiento de trayectorias.
- Implementar tanques de lastres.
- Poner timones y aletas controladas por servo motores.
- Incorporar más sensores.
- Implementar filtros y fusión de datos.
- Desarrollar y probar métodos de control diferentes y más específicos para esta aplicación.
- Incorporar un botón de encendido y uno de paro de emergencia.
- Agregar sonar con barrido angular.
- Hacer una guía de planeación para experimentación.
- Formar un equipo de trabajo (más de 4 personas si es posible), enfocado en el desarrollo y mejora de un *AUV* en todos los ámbitos.
- Orientar al equipo de trabajo para que trabajen en tiempo y forma, con lo que lograrán mejores resultados.

- Si se desea obtener un producto comercial, se deben de invertir los recursos necesarios y suficientes para lograrlo.

Bibliografía

- [1] P. ; Carreras M. ; Hernandez E. Mallios, A. ; Ridao. Navigating and mapping with the sparus auv in a natural and unstructured underwater environment. *IEEE OCEANS*, . (.):1 – 7, . 2011. URL [N/A](#).
- [2] Jaime Zavala Cetina. *Localización Submarina Mediante Múltiples Senores Acústicos*. N/A, Mexico City, 2015.
- [3] Gabriel Oliver Alberto Ortiz, Miquel Simó. A vision system for an underwater cable tracker. *Machine Vision and Applications*, 13(N/A):129–140, N/A 2002. URL [N/A](#).
- [4] Jonathan Braithwaite. An introduction to hydrodynamics. *Lectures by M. Cantiello*, .(.):1–103, Marzo 2011. URL https://astro.uni-bonn.de/~jonathan/misc/hydro_notes.pdf.
- [5] Oscar A. Calvo Gerard0 G. Acosta, Hugo J. Curti. Autonomous underwater pipeline inspection in autotracker project: the navigation module. *Oceans*, N/A(N/A):389–394, N/A 2005. URL [N/A](#).
- [6] Robert K. Coulson Stewart A. L. Glegg, Marc P. Olivieri and Samuel M. Smith. A passive sonar system based on an autonomous underwater vehicle. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING.*, 26(4):700–710, October 2001. URL [N/A](#).
- [7] Roy Edgar Hansen. Introduction to sonar. *Course materiel to INF-GEO4310.*, N/A (N/A):1–11, October 2009. URL [N/A](#).
- [8] Thor I. Fosen. *Marine Control Systems*. John Wiley and Sons, University of Trondheim, Norway, 2002.

-
- [9] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and Sons, University of Trondheim, Norway, 1994.
- [10] Thor I. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley and Sons, University of Trondheim, Norway, 1994.
- [11] Sighard F. Hoerner. *Fluid-Dynamic Drag*. Published by the Autor, USA, 1965.
- [12] Enrique Fernandez Aaron Martinez. *Learning ROS for Robotics Programming*. PACKT Publishing, Brimingsm-Mumbai, 2013.