



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO

PROGRAMA DE
SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

**”Estabilización de un mini submarino mediante el control de
Backstepping con enfoque a localización acústica”**

T E S I S

Que presenta

Jaime de Jesús ZAVALA CETINA

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

SISTEMAS AUTÓNOMOS DE NAVEGACIÓN AÉREA Y SUBMARINA

Directores de la Tesis:

Dr. Pedro Castillo

Dr. Aldo Orozco

México, D.F.

Junio, 2015

Resumen

”Estabilización de un mini submarino mediante el control de Backstepping con enfoque a localización acústica”

Los AUV son vehículos autónomos submarinos que pueden realizar tareas específicas bajo el agua en un tiempo determinado, dependiendo de la duración de las baterías, ya que a diferencia de los ROV, los AUV no cuentan con cables para obtener energía o datos. Para que estos vehículos puedan ser autónomos necesitan tener un buen diseño electrónico que incluya sensores, actuadores y controles. Para que estos puedan estar bajo el agua se necesita un buen diseño mecánico que brinde hermeticidad e hidrodinámica. Con diversos algoritmos de control se puede estabilizar el sistema y llevar a cabo la navegación, sin embargo para navegar es necesario conocer el posicionamiento del vehículo, pero determinar la posición de un submarino bajo el agua es complicado ya que al no haber propagación de ondas electromagnéticas no se tiene comunicación bajo el agua, impidiendo el uso de GPS. Para tratar de solucionar ésto se ha propuesto el uso de comunicación y señales acústicas para poder conocer la posición. Existen diferentes métodos y técnicas de localización acústica que se pueden utilizar. También es posible conocer la posición relativa a un punto o un camino por medio de un sonar. En este trabajo se logró crear un prototipo denominado Sx-1013 que mantiene una profundidad y orientación deseada y que está listo para que se le agregue un sensor acústico que le permita navegar.

Abstract

AUV means autonomous underwater vehicles that can perform specific tasks under water at a given time, depending on the battery life, because unlike ROVs, AUVs do not have cables for power and data transmission. For these vehicles to be autonomous need to have a good electronic design to include sensors, actuators and controls. So that they can be under the water needs a good mechanical design that provides hermeticity and hydrodynamics. With various control algorithms can stabilize the system and perform navigation, but to navigate is necessary to know the position of the vehicle, but determining the position of a submarine under water is complicated because the absence of propagation of electromagnetic waves there is no communication under water, preventing the use of GPS. To try to solve this has been proposed to use communication and acoustic signals to know the position. There are different methods and techniques of acoustic location that can be used. It is also possible to know the relative position of a point or a path by using a sonar. In this work it was possible to create a prototype called SX-1013 that maintains a desired depth and orientation and is ready to be added an acoustic sensor that allows it to navigate.

Agradecimientos

A la UMI-LAFMIA por apoyarme en la adquisición de conocimientos fundamentales para esta tesis y brindarme cursos de calidad con excelentes profesores, así como brindarme un lugar adecuado de trabajo para desarrollar mi trabajo.

Al CINVESTAV Unidad Zacatenco por todos los recursos, materiales e infraestructura proporcionada para la culminación de esta tesis.

Al CONACYT por el apoyo económico recibido que me permitió terminar con éxito mi maestría.

A mi familia Padme e Irán por su apoyo y darme la fuerza para salir adelante en momentos difíciles.

A mi madre Tere, mi hermana Karla y mi tía Magda por su apoyo en todo.

A la familia Huidobro Gonzalez Camino por ayudarme cada vez que lo necesitaba.

A Fernando Huidobro por todos los conocimientos que me ayudo a obtener a lo largo de mi vida.

A José Carlos Rangel por todo su apoyo en el proyecto y su trabajo en equipo.

A Sergio Reyes por su ayuda a lo largo de la maestría.

A mis compañeros de la UMI-LAFMIA.

Al Dr. Pedro Castillo, al Dr. Iván Torres Tamanaja, al Dr. Aldo Orozco, Al Dr. Rogelio Lozano, al Dr. Sergio Salazar, al Dr. Jorge Torres, al Dr. Omar Santos, al Dr. Eduerdo Steed Espinoza, al Dr. Hugo Romero y al Dr. Alexander Poznyak, por sus enseñanzas y valiosas aportaciones a este trabajo de tesis.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Índice general	IV
Lista de Figuras	VII
Lista de Tablas	IX
Abreviaturas	X
1. Introducción.	1
1.1. Definición del problema.	2
1.1.1. Seguimiento de trayectoria alrededor de un “pinger”.	2
1.2. Justificación.	3
1.3. Hipótesis.	4
1.4. Objetivos.	4
2. Estado del arte.	5
2.1. Argonauta.	5
2.2. AUV	6
2.3. Comunicación acústica para la navegación.	8
2.4. Sistemas de posicionamiento acústico bajo el agua.	8
2.5. Sistemas de navegación submarina.	10
2.6. Sistemas de localización acústica submarina.	12
2.6.1. Ultrashort y Short baseline.	13
2.6.2. Sensores para la navegación submarina.	13
3. Modelo Matemático del submarino.	15
3.1. Cinemática.	15
3.1.1. Marcos de Referencia.	16
3.1.1.1. Marcos de referencia centrados en la Tierra.	16

3.1.1.2. Marcos de referencia geográficos.	16
3.2. Cinemática, modelo del AUV Sx-1013	21
3.3. Dinámica	22
3.3.1. Vector de restitución.	26
3.4. Dinámica del AUV Sx-1013	28
3.4.0.1. Marco inercial.	32
3.5. Simulación en lazo abierto.	34
4. Control	41
4.1. <i>Backstepping</i> [1]	41
4.2. Generación de trayectorias. [2]	45
4.2.1. Control para vehículos acuáticos subactuados.	45
4.2.2. Sistema de guía (<i>Line Of Sight</i> .)	46
4.3. Diseño de control <i>Backstepping</i> utilizando <i>Line of Sight</i> [2]	47
4.3.1. Diseño del control	48
5. Prototipo	50
5.1. Diseño mecánico	50
5.2. Diseño conceptual.	52
5.3. Diseño virtual.	52
5.4. Simulación.	53
5.5. Diseño detallado.	54
5.6. Fabricación.	55
5.7. Diseño electrónico.	57
5.7.1. Arquitectura electrónica.	58
5.7.2. Procesamiento.	58
5.7.2.1. Intel NUC y ROS.	58
5.7.2.2. DSP	60
5.7.3. Sensores.	61
5.7.3.1. IMU MicroStrain 3DM-GX1	61
5.7.3.2. IMU CHR6-LT.	62
5.7.3.3. Sensor de presión BMP085.	63
5.7.3.4. Sensor de presión Keller.	64
5.7.4. Comunicaciones.	67
5.7.4.1. Conectores.	67
5.7.4.2. FTDI y Convertidor RS-485.	67
5.7.4.3. Microcontrolador.	68
5.7.5. Potencia.	68
5.7.5.1. Motores.	68
5.7.5.2. Controladores de motores.	68
5.7.5.3. Baterías.	69
6. Resultados.	71
6.1. Prototipo AUV Sx-1013.	71
6.2. Resultados experimentales.	74

7. Conclusiones y Perspectivas	81
---------------------------------------	-----------

Bibliografía	83
---------------------	-----------

Índice de figuras

1.1. AUV generando una trayectoria plana alrededor de un <i>pinger</i>	3
2.1. Imágenes mas relevantes del museo Argonauta en París Francia.	6
2.2. Ejemplos de AUV.	7
2.3. Métodos y sensores de navegación.	11
2.4. Sistemas de localización acústica.	13
3.1. Marcos de referencia.	17
3.2. Sistema coordenado del AUV	21
3.3. Fuerzas sobre el cuerpo del submarino.	28
3.4. Simulaciones.	35
3.5. Simulaciones.	36
3.6. Simulaciones, trayectoria en 3D.	36
3.7. Simulaciones.	36
3.8. Simulaciones.	37
3.9. Masa agregada a lo largo del eje x.	38
3.10. Masa agregada a lo largo del eje y.	39
4.1. Diagrama a bloques en <i>simulink</i> del control <i>backstepping</i>	44
4.2. Control por <i>Backstepping</i>	45
5.1. Proceso empleado para el diseño del AUV.	51
5.2. Diseños previos.	52
5.3. Diseño virtual del AUV.	52
5.4. Virtualización del concepto 3.	53
5.5. Dibujo del AUV en CAD.	54
5.6. Dibujo CAD.	54
5.7. Diseño CAD detallado con todas sus piezas.	55
5.8. Manufactura de cilindros.	56
5.9. Manufactura de bridas.	56
5.10. Manufactura de tapas.	57
5.11. Estructura con los cilindros.	57
5.12. Diagrama del diseño del AUV.	58
5.13. Arquitectura de conexiones electrónicas del AUV.	58
5.14. Arquitectura electrónica del AUV.	59
5.15. CPU Intel NUC.	60
5.16. Esquema de nodos de ROS.	60

5.17. Procesador digital de señales ONIK.	61
5.18. IMU MicroStrain 3DM-GX1.	62
5.19. Gráfica de datos de la IMU MicroStrain 3DM-GX1 en ROS.	62
5.20. IMU CHR6-LT.	63
5.21. Sensor de presión BMP085.	64
5.22. Gráfica con los datos del sensor de presión BMP085.	64
5.23. Sensor de presión Keller.	65
5.24. Gráfica de los datos del sensor de presión keller (ROS).	66
5.25. Gráfica con los datos del primer experimento con el sensor keller en una alberca.	66
5.26. Conectores.	67
5.27. Conectores.	67
5.28. Arduino uno R3.	68
5.29. Motores <i>Crustcrawler</i>	68
5.30. Controlador de motor.	69
6.1. Componentes principales del Sx-1013.	71
6.2. Ejes de movimiento del Sx-1013.	72
6.3. Manufactura de bridas.	72
6.4. AUV Sx-1013 completo y funcional.	73
6.5. Prototipo Sx-1013 con carcasa.	74
6.6. Profundidad deseada.	75
6.7. Velocidad en el eje z con <i>Backstepping</i>	76
6.8. Control <i>Backstepping</i> en z	76
6.9. Gráfica de la profundidad del AUV con <i>Backstepping</i>	77
6.10. Velocidad angular en yaw con <i>Backstepping</i>	77
6.11. Control <i>Backstepping</i> en yaw.	78
6.12. Orientación en yaw con <i>Backstepping</i>	79
6.13. AUV con una orientación de yaw a cero grados	79
6.14.	80

Índice de cuadros

2.1. Tres principales grupos de posicionamiento acústico.	12
2.2. Sensores.	14
3.1. Notación SNAME para vehículos marinos.	16
3.2. Notación SNAME expresada en vectores.	18
5.1. Cálculo de potencia para el compartimento 1	69
5.2. Cálculo de potencia para el compartimento 2	70

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 revolucionaron el proceso de obtención de datos en el 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. Un método de categorizarlos es identificándolos como miembros de una de dos clases de vehículos: de sistemas tripulados y no tripulados. Los vehículos submarinos no tripulados están distribuidos a su vez en dos diferentes subclases: Los Vehículos Operados Remotamente (ROV) y los Vehículos Autónomos Submarinos (AUV). Los ROV son vehículos sumergibles que comúnmente se encuentran conectados a un cable soportado a un barco desde donde es controlado y obtiene energía. Los AUV son vehículos que no se encuentran físicamente conectados a ningún soporte. Éstos pueden realizar misiones pre definidas con la asistencia de algoritmos, controles y sensores.

1.1. Definición del problema.

1.1.1. Seguimiento de trayectoria alrededor de un “pinger”.

Teniendo una velocidad controlable y un ángulo yaw y yaw deseado, se busca que el *AUV* cree una trayectoria [3] alrededor de un *pinger*. Este *pinger* estará emitiendo un sonido cada determinado tiempo y suponiendo que el *AUV* tiene un receptor, se podrá conocer su posición (x,y) con respecto al *pinger* y de esta manera podrá realizar su trayectoria al rededor del mismo. Una primera aproximación con ecuaciones para determinar el radio y el ángulo de la trayectoria con respecto al *pinger* sería:

$$r = (x^2 + y^2)^2 \quad (1.1)$$

$$\alpha = \arctan(y/x) \quad (1.2)$$

Para el desarrollo e implementación del algoritmo de seguimiento de trayectorias se considera lo siguiente:

- La velocidad puede ser variable y controlable.
- El radio y el ángulo de la trayectoria circular son conocidos.
- La posición del *pinger* es conocida por el *AUV*.
- La trayectoria es seguida solo en el plano (x,y) .

El problema en cuestión se ilustra en la figura 1.1:

donde:

- O es el origen del marco de referencia inercial.
- O' es el *pinger* o *beacon*.
- u es la velocidad del *AUV*.
- r son las distancias entre el *pinger* y el *AUV*.

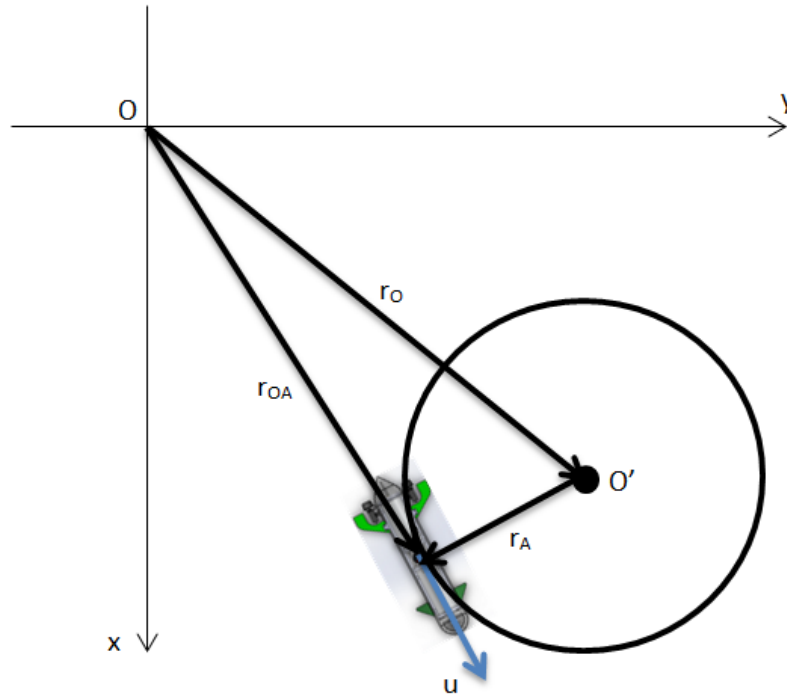


FIGURA 1.1: AUV generando una trayectoria plana alrededor de un *pingir*.

1.2. Justificación.

Los *AUV* tienen diversas aplicaciones en la industria petrolera, geográfica, científica y militar. Dichas aplicaciones se enfocan en la realización de diferentes misiones donde el vehículo debe ser lo suficientemente preciso para realizar tareas encomendadas con éxito. Por consiguiente la navegación del mini-submarino es crucial, sin embargo para que pueda navegar correctamente es necesario conocer la posición del mismo para que sea utilizada por un algoritmo y un control y que de esta manera logre seguir las trayectorias y navegar partiendo de la suposición de que el vehículo conoce sus coordenadas. A la fecha, resulta complicado conocer la precisa localización del submarino ya que no se puede utilizar GPS en el agua y la comunicación acuática es más complicada que en el aire. [4] Diversos estudios han comprobado que la visión, las ondas de radio y la comunicación óptica no son una buena opción para la comunicación, sin embargo la comunicación acústica ha tenido mejores resultados para poder recibir señales o datos bajo el agua. En el presente trabajo se tratará la teoría de la comunicación acústica y sus métodos de localización para determinar la posición del AUV. La aportación principal de esta tesis es un prototipo estable controlado en profundidad y orientación, diseñado para portar un sonar y obtener una posición relativa a un punto o camino deseado y de esta forma

navegar mediante métodos acústicos, de la misma manera este prototipo esta pensado para que el laboratorio UMI-LAFMIA pueda participar en concursos internacionales.

1.3. Hipótesis.

Es posible realizar el diseño y la fabricación de un prototipo AUV Mexicano denominado Sx-1013, para pruebas de comunicación acústica y para que pueda tener participaciones internacionales, este prototipo estará controlado en orientación y profundidad.

1.4. Objetivos.

- Diseñar un prototipo de un AUV.
- Fabricación del prototipo AUV Sx-1013.
- Implementar un control de estabilización basado en la técnica de *Backstepping*.
- Realizar pruebas con el AUV utilizando el algoritmo de control.

Capítulo 2

Estado del arte.

En este capítulo se mostrarán los trabajos que se han desarrollado en este tema, se analizarán algunos trabajos que se han realizado y se resaltara la importancia de los vehículos autónomos. Se describirán los métodos de navegación y localización acústica más utilizados por las comunidades civiles y militares, así como los que se están desarrollando actualmente en la investigación científica.

2.1. Argonauta.

En París, Francia se encuentra el museo del Argonauta, 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 los torpedos los cuales se observa cierta similitud estructural a los AUV actuales. Entre los parecidos que cabe resaltar se encuentran los sistemas acuáticos y sonares implementados para seguimiento de objetivos y el uso de *O-rings* para la hermeticidad.

En la figura [2.1](#) 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.

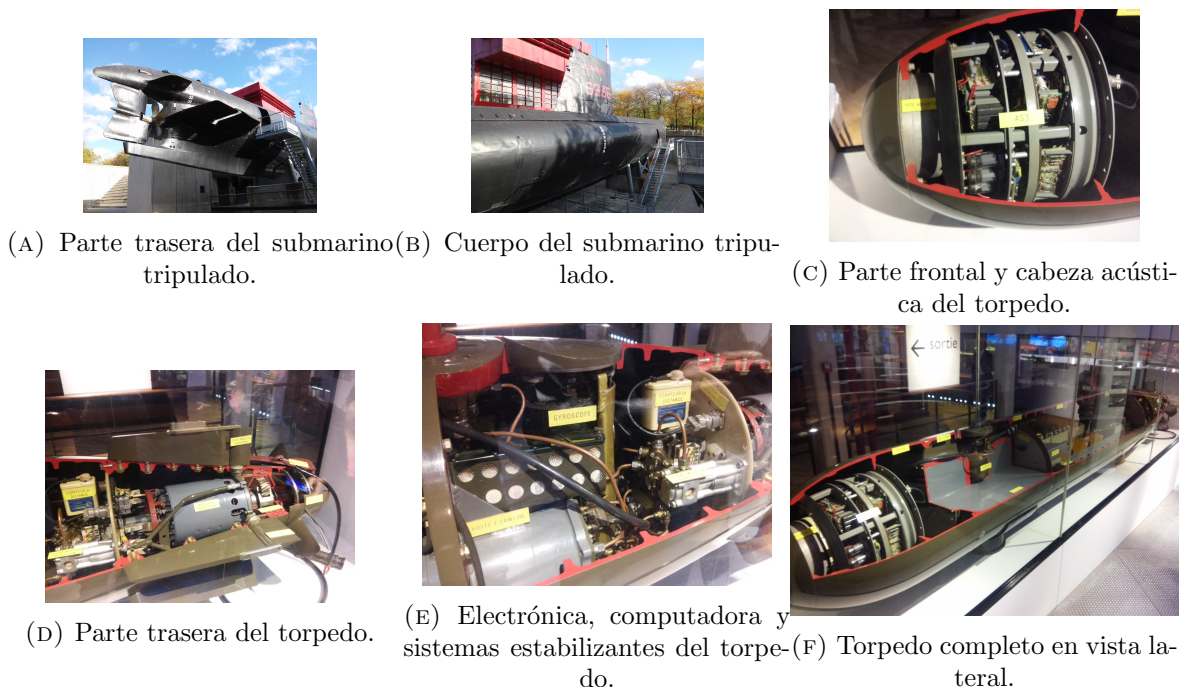


FIGURA 2.1: Imágenes mas relevantes del museo Argonauta en París Francia.

2.2. AUV

Los vehículos autónomos submarinos (*AUV*) son dispositivos robóticos relativamente pequeños, autopropulsados, no tripulados. Éstos son usualmente programados para llevar a cabo una variedad de misiones submarinas y pueden ser puestos en marcha y recuperados en la costa o en el mar [5]. La mayoría de los *AUV* pueden operar en un rango desde 200 metros hasta más de 5000 metros (Simmoneti, 1998). Los torpedos son considerados los primeros *AUV* utilizados con fines militares desde el siglo XIX, sin embargo el primer *AUV* fue desarrollado en el Laboratorio de Física Aplicada en la Universidad de Washington en 1957 por Stan Murphy, Bob Francois y Terry Ewart. *The Special Purpose Underwater Research Vehicle* “SPURV” fue utilizado para estudiar la difusión y transmisión acústica. En las últimas décadas los *AUV* han sido usados con propósitos militares, siendo el sector defensa el primer promotor de su desarrollo para labores de detección de minas y proyectiles inteligentes, por ejemplo el *AUV* militar *HUGIN* que se desarrolló y ha sido utilizado para localizar y detectar amenazas de minas marinas por el Establecimiento de Investigación de la Defensa Noruega *FFI* [6]. De forma más reciente se han implementado en investigaciones de inspección comercial como es el caso de la búsqueda y localización de petróleo y en plataformas

pesqueras. Sus usos con fines de investigación científica y académica se han extendido hacia áreas de la biología marina, arqueología marina, monitoreo de ecosistemas, tecnologías del fondo del mar, estudio de hábitat marino, estudio de migración, estudios geológicos, muestreo de aguas y sedimentos, muestreo de fauna marina, entre muchas otras aplicaciones[7]. Por mencionar algunos ejemplos, el URASHIMA fue desarrollado por *Mitsubishi Heavy Industries* y usado con fines de exploración de recursos minerales marinos de mares profundos [8]; el ABE (*Autonomous Benthic Explorer*) se diseñó para monitorear el suelo marino; el OVII (*Ocean Voyager*) fue diseñado con fines académicos y utilizado posteriormente para medir el ambiente costero de aguas poco profundas por miembros de la USF (*University of South Florida*), el prototipo AUV *Sparus* fue el campeón de la competencia internacional en Italia en años recientes, entre muchos otros [9]. Otra gran aplicación de los AUV es la reparación de instalaciones submarinas, involucrados concretamente en la inspección de tuberías y cables submarinos, mapeo de precisión del fondo marino para evaluaciones hidrográficas y planeación de tuberías sumergidas y cableados submarinos, entre otras[10]. Los AUV pueden ser programados para navegar en tres dimensiones bajo el agua. Los avances requeridos para un despliegue seguro, control de la misión, desempeño y la recuperación del vehículo han desarrollado considerablemente en los últimos años [11].



(A) Prototipo Hugin 1000 de Noruega



(B) Prototipo Sparus de España.

FIGURA 2.2: Ejemplos de AUV.

2.3. Comunicación acústica para la navegación.

El sonido es producido cuando un objeto vibra rápidamente y perturba las moléculas cercanas del medio circundante y genera ondas que viajan en todas direcciones lejos de la fuente. La comunicación acústica está caracterizada por tres factores principales: atenuación, que depende de la frecuencia de la señal; propagación multi trayectoria y baja velocidad del sonido. La comunicación acústica submarina es la técnica de enviar y recibir mensajes bajo el agua. La forma más común de implementar este tipo de comunicación es mediante el uso de hidrófonos. La comunicación bajo el agua es difícil, debido a factores como la propagación multitrayecto, las variaciones temporales del canal, pequeño ancho de banda disponible y fuerte atenuación de la señal, sobre todo en distancias largas. En la comunicación bajo el agua hay velocidades de datos bajas en comparación a la comunicación aérea, ya que bajo el agua se utilizan ondas acústicas en lugar de ondas electromagnéticas. La necesidad de la comunicación submarina inalámbrica radica en algunas aplicaciones en la industria, como control remoto de costas petroleras, en el monitoreo de contaminación ambiental, en la recolección de datos científicos, en la transmisión de voz entre buzos, en el mapeo del suelo marino para la detección de objetos, entre otras. [12] La comunicación submarina inalámbrica puede ser establecida por la transmisión de ondas acústicas. Esto hace posible la transmisión de señales sin la necesidad de conexiones físicas y permite la recolección de datos de instrumentos sumergidos sin intervención humana y sin obstáculos de operación de Vehículos Submarinos no Tripulados (UUV). Comparado a las plataformas tradicionales para instrumentos acústicos, los AUV pueden muestrear ambientes anteriormente impenetrables tales como la superficie y profundidad del mar y bajo aguas congeladas. Además, los AUV son típicamente pequeños, silenciosos y tienen el potencial de operar a bajo costo y sin restricciones en una variedad de sistemas acuáticos (Fernandes, Et al., 2003).

2.4. Sistemas de posicionamiento acústico bajo el agua.

En muchas aplicaciones terrestres o acuáticas, la localización de un objeto en movimiento debe ser obtenida. El proceso de adquirir la localización de un objeto de interés es llamado posicionamiento. Uno de los sistemas de posicionamiento mas conocido es el GPS, los satélites usados en el GPS están equipados con relojes atómicos y mandan señales de radio con la hora

exacta y con su localización, la señal de radio son tomadas por el receptor de GPS y cuando capta 4 satélites o mas puede triangular su posición con respecto a la posición conocida de los satélites. La señal usada en GPS es una señal electromagnética, la cual se propaga bien en el aire pero bajo el agua solo puede viajar una distancia muy corta por su alta tasa de absorción en el agua. En las áreas donde el GPS no puede funcionar, sistemas alternativos como el posicionamiento bajo el agua juegan un papel muy importante. Un sistema de posicionamiento acústico bajo el agua brinda las coordenadas de vehículos submarinos o buzos por medio de distancias acústicas y medición de direcciones, subsecuentemente la posición por triangulación.

En diversas áreas de investigación de la ciencia del océano, en misiones de la ingeniería en la industria y en actividades militares, se requiere posicionar objetivos submarinos respecto a una plataforma. Los componentes básicos de un sistema de posicionamiento acústico incluye un *transceiver* y un arreglo de *transponders* (o un *transponder* y un arreglo de *transceivers*), una unidad de procesamiento y una interfaz que muestra los datos.

En los sistemas de posicionamiento acústico submarino, la distancia entre los *transponders* en el arreglo es llamado “baseline”, estos incluyen long baseline (LBL), short baseline (SBL), y ultra-short baseline (USBL), estos son diseñados para operar desde una plataforma de referencia y utilizar transductores externos o arreglo de transductores para determinar la posición. Los sistemas de posicionamiento acústicos miden el tiempo de vuelo (TOF) de una señal acústica que viaja del objetivo a la plataforma de referencia, por el método de correlación cruzada.

Para SBL y USBL no es necesario desplegar transductores y calibrarlos en el fondo del mar, así que son sistemas mas simples que el LBL sin embargo la precisión del posicionamiento de estos sistemas dependen de sensores adicionales como un *gyro* en el barco de apoyo o un sistema de navegación en la superficie. El sistema acústico integrado (IAS) funciona de manera similar a un típico sistema de posicionamiento acústico LBL, el cual se ofrece comercialmente como solución a un numero grande de aplicaciones de posicionamiento marino, a menudo para mayor precisión y un rango mas grande alternativo a un sistema basado en una nave de apoyo con el USBL [13]

La precisión de las mediciones de los sistemas de posición acústicos es limitado por dificultades acústicas en el ambiente bajo el agua, adicionalmente la variación de la velocidad del sonido, inhomogeneidades en el medio, corrientes del océano, interferencias multitrayectoria y el error que proviene de las perturbaciones en el vehículo o la geometría del arreglo de hidrófonos.

A diferencia de métodos de posicionamiento tradicionales basados en la medición del tiempo de vuelo, el método propuesto conduce al posicionamiento mediante la medición continua entre la fase cero que es la señal de referencia y una señal acústica transmitida por el objetivo. Este método se llama posicionamiento basado en la medición de la fase (PPHM). En éste la posición inicial del objetivo con respecto a la plataforma de referencia se supone conocido.

2.5. Sistemas de navegación submarina.

En general las técnicas de navegación y localización se pueden categorizar de la siguiente manera: [14]

- *Inercial / deadreckoning*: La navegación inercial usa acelerómetros y giroscopios, sin embargo estos métodos tienen un error de posición que puede ir creciendo debido a que no hay una retroalimentación de otros sensores en donde se pueda hacer una comparación para corregir el error.
- *Modems acústicos y transponders*: Estas técnicas son basadas en medir el tiempo de llegada (TOA) de señales de dispositivos acústicos, también se mide el ángulo de llegada de la señal. Con estos datos se realiza un algoritmo de localización ya sea esférica, hiperbólica o de triangulación. Los *modems* se utilizan para enviar datos con un ancho de banda muy limitada.
- *Geo-físico*: Estas técnicas utilizan información externa al vehículo, como corrientes de agua u otro tipo de perturbaciones. Están hechas para censar, detectar, identificar y clasificar algunas características en el ambiente.

La navegación de un AUV puede ser organizada como lo muestra la figura 2.3:

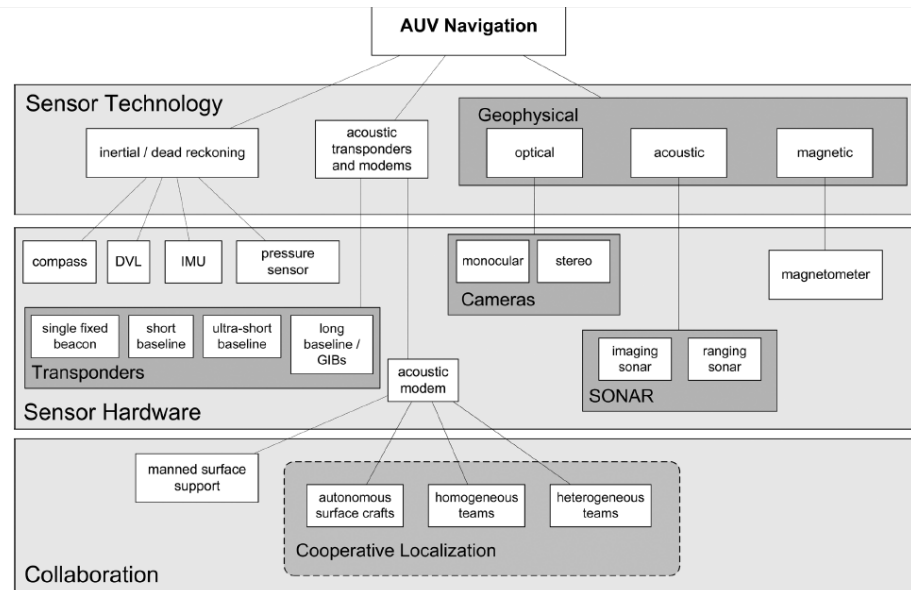


FIGURA 2.3: Métodos y sensores de navegación.

El tipo de sistema de navegación usado depende en muchas ocasiones del tipo de operación o de la misión que se va a desempeñar y en algunos otros casos estos sistemas se pueden combinar para mejorar su rendimiento o precisión. Lo más importante que se tiene que considerar para seleccionar el sistema es la distancia que se va a necesitar y la precisión de la localización que se desea.

Ha habido avances significativos en este tema, en tecnologías ya establecidas tanto como nuevas áreas. En particular el desarrollo de comunicaciones acústicas a través del uso de modems acústicos bajo el agua llevaron al desarrollo de nuevos algoritmos para este tipo de comunicación, adicionalmente la investigación con respecto al SLAM ha sido aplicado en operaciones bajo el agua de diversas formas.

La mayoría de los sistemas de modems procesan y filtran los datos de los sensores que derivan en una coherente y recursiva estimación de la posición del AUV.

2.6. Sistemas de localización acústica submarina.

En técnicas de navegación acústica, se puede obtener la localización con las mediciones de los rangos del *TOF* de una señal acústica. Los métodos más comunes para la localización submarina de este tipo son: USBL,SBL Y LBL (tabla 2.1)

- USBL: Los transductores en el *tranceptor* están muy cerca el uno del otro, aproximadamente en el orden de menos de 10 *cm* de distancia entre un transductor y otro. Rangos relativos son calculados basados en el *TOF*, y el retraso es calculado con la diferencia de fase de la señal de llegada al transeptor.
- SBL: Los transductores son colocados en orillas opuestas del casco del barco de apoyo, la distancia entre cada transductor esta determinada por el tamaño del barco.
- LBL y GIBs: Los puntos acústicos se colocan en una área grande, la localización esta basada en la triangulación de las señales acústicas, en el caso de GIBs los puntos acústicos están en la superficie mientras que LBL están en el fondo.
- *Single fixed beacon*: La localización del vehículo se realiza solo con un solo punto acústico.
- *Modem* acústico: La autonomía completa de los AUV puede ser alcanzada con *modems* acústicos con la ayuda de vehículos autónomos en la superficie, estos permiten tener puntos acústicos móviles y comunicarse entres si, como en equipos submarinos.

CUADRO 2.1: Tres principales grupos de posicionamiento acústico.

Tipo de Sistemas	largo del baseline	Estrategia de posicionamiento
Long Baseline (LBL)	50m ~ 6000m	únicamente medición de alcance.
Short Baseline (SBL)	10m ~ 50m	medición de alcance y dirección.
Ultra Short Baseline (USBL)	< 10cm	medición de alcance y dirección.

2.6.1. Ultrashort y Short baseline.

La navegación con USBL permite al AUV localizarse a un objeto o punto específico, y de esta manera localizarse relativamente con respecto a ese punto, objeto o nave de apoyo en la superficie. El rango relativo y el retraso están determinados por el *TOA* y la diferencia de fase en el arreglo de transductores que en la mayoría de los casos son hidrófonos. En SBL los transductores están separados a lo largo del casco del barco de apoyo y el algoritmo de localización más usado en esta técnica es el de triangulación. La mayor limitación de USBL es el rango mientras que en SBL la precisión de la posición depende del tamaño del barco de apoyo. En [15] una boya equipada con USBL Y GPS diferencial es utilizada para ayudar a mejorar el *Dead Reckoning* (DR) del AUV que utiliza una unidad de referencia de movimiento MRU, DVL y FOG. Un *Extended Kalman Filter* (EKF) es usado para fusionar todos los datos de los sensores. El método propuesto en [13] usa el tiempo de retraso de la transmisión para mejorar la precisión.

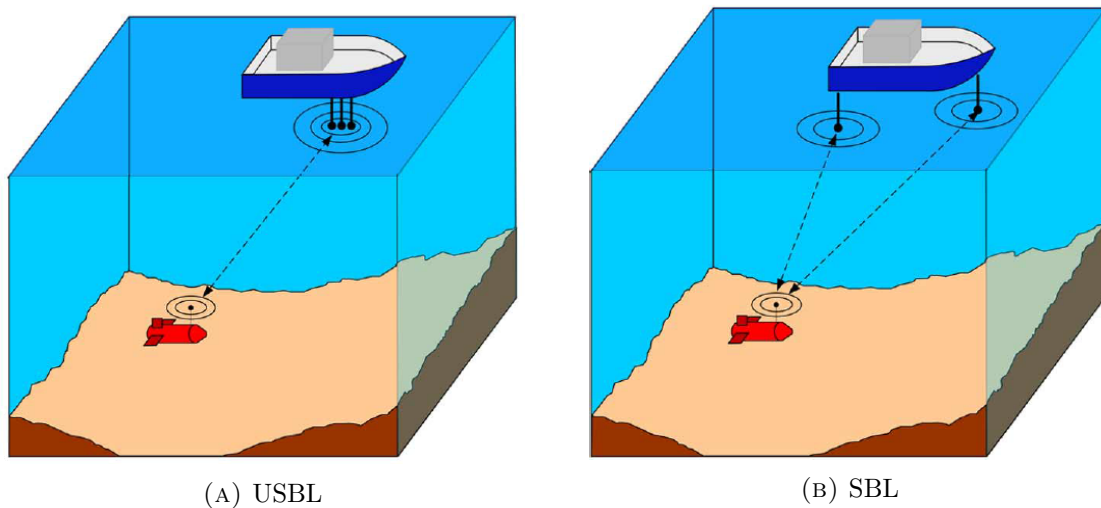


FIGURA 2.4: Sistemas de localización acústica.

2.6.2. Sensores para la navegación submarina.

En la tabla 2.2 se muestran los sensores más utilizados para la navegación de los AUV.

CUADRO 2.2: Sensores.

Sensor	Descripción	Desempeño y Costo
Brújula.	Mide el vector del campo magnético, también apuntan hacia el norte, común en aplicaciones marinas el gyrocompas mide el cabeceo usando un disco que gira rápidamente y la rotación de la tierra.	Su precisión es de 1 o 2 grados de error. Precio: En el orden de cientos de dolares.
Sensor de Presión.	La profundidad submarina puede ser medida con un barómetro o sensor de presión.	El gradiente de presión es mas pronunciado debajo del agua($10m = 1atm$) Precio: aprox. \$100 a \$200
<i>Doppler Velocity Log (DVL).</i>	El DVL usa mediciones acústicas que captura del fondo del océano para determinar el vector de velocidad en movimiento.	tiene un error de $0,3cm/s - 0,8cm/s$ Precio: aprox. \$20000 a \$80000
Sonar.	Es un dispositivo para localizar remotamente objetos en el agua mediante el sonido. El sonar pasivo escucha los sonidos que se generan en el agua. El sonar activo produce ondas de sonido con frecuencia controlada y escucha el eco de estas emisiones.	Pueden alcanzar distancias de 38m hasta 250m Precio: va desde \$20000 a \$200000 o mas.
<i>Global Positioning System (GPS).</i>	Pueden ser usados en los vehículos que están en la superficie terrestre. La posición es estimada usando el tiempo de vuelo (TOF) de las señales de satélites sincronizados.	Muchos factores pueden afectar la precisión del GPS, como la condición atmosférica la técnica utilizada el numero de satélites en vista etc. Las presiciones para diferentes sistemas son: GPS común -10m, WADGPS -0.3 - 2m, <i>Real Time Kinematic (RTK)</i> - 0.005-0.5m. Precio: desde cientos hasta miles de dolares
<i>Inertial Measurment Unit (IMU).</i>	Usa una combinación de acelerómetros y giroscopios y algunas veces magnetómetros para estimar la orientación del vehículo, velocidad y fuerzas gravitacionales. El giroscopio mide la velocidad angular, en las aplicaciones submarinas se ocupan de dos tipos, MEMS y <i>Ring Laser</i> /fibra óptica. Los giroscopios tienen un deslizamiento en los ángulos de Euler estimados debido a la integración, por lo tanto para esto se implementan diversos filtros en las IMU que son muy importantes para su desempeño. Los acelerómetros miden las fuerzas requeridas para acelerar una masa.	Pueden tener un deslizamiento de 0.0001/hr hasta 60/hr, en el caso de los acelerómetros pueden tener un error de $0.01mg$ para los MEMS o $0.001mg$ para los péndulos. Precio: pueden ser desde cientos de dolares hasta cientos de miles de dolares.

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.[1]

3.1. Cinemática.

Las ecuaciones de movimiento de un vehículo marino de 6 grados de libertad pueden ser expresadas en forma vectorial. [16]

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

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

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. [17]

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.

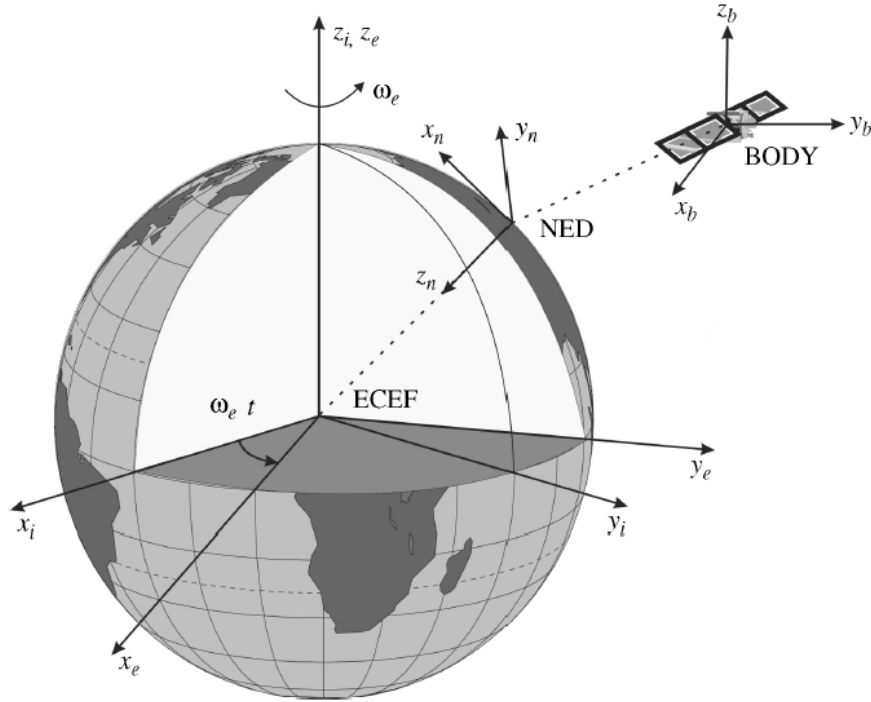


FIGURA 3.1: Marcos de referencia.

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.

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

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 $\omega_{b/n}^b = [p \quad q \quad r]^T$ y el vector de los ángulos de Euler $\dot{\Theta}_{nb} = [\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T$ 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

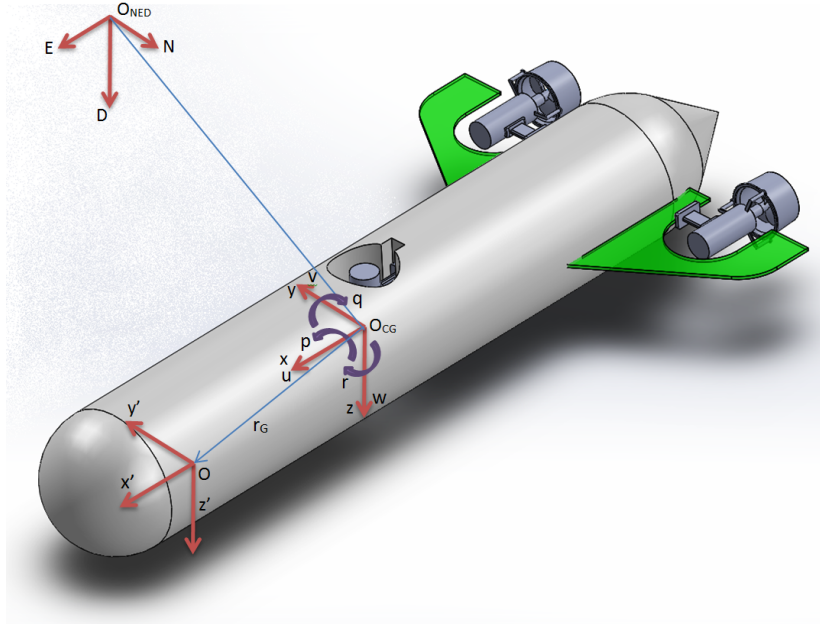


FIGURA 3.2: Sistema coordenado del AUV

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:

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

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

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

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

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

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:

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

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

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:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} W s \theta - B s \theta \\ B c \theta s \phi - W c \theta s \phi \\ B c \theta c \phi - W c \theta c \phi \\ B y_b c \theta c \phi + B z_b c \theta s \phi - W y_G c \theta c \phi + W z_G c \theta s \phi \\ B z_b s \theta + W z_G s \theta - B x_b c \theta c \phi + W x_G c \theta c \phi \\ B y_b s \theta - W y_G s \theta + B x_b c \theta s \phi - W x_G c \theta s \phi \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.4. Dinámica del AUV Sx-1013

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

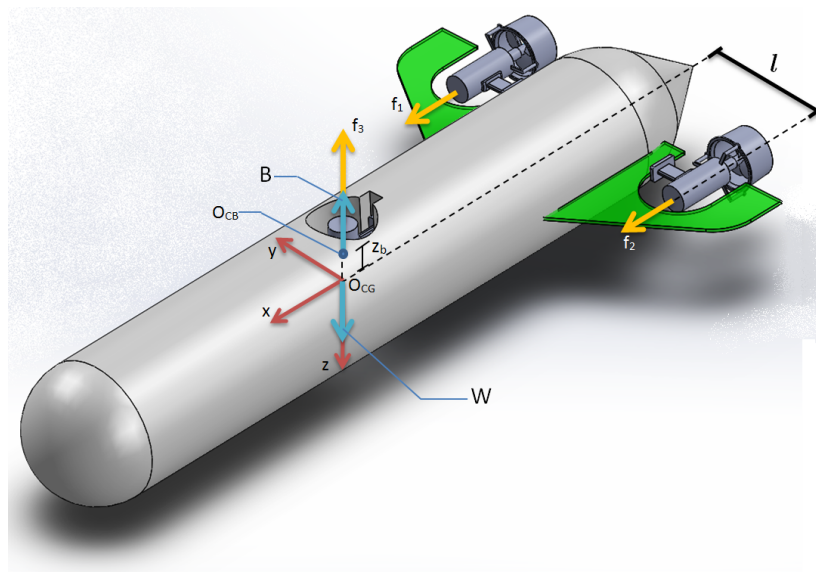


FIGURA 3.3: Fuerzas sobre el cuerpo del submarino.

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: [18]

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

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 aw 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.

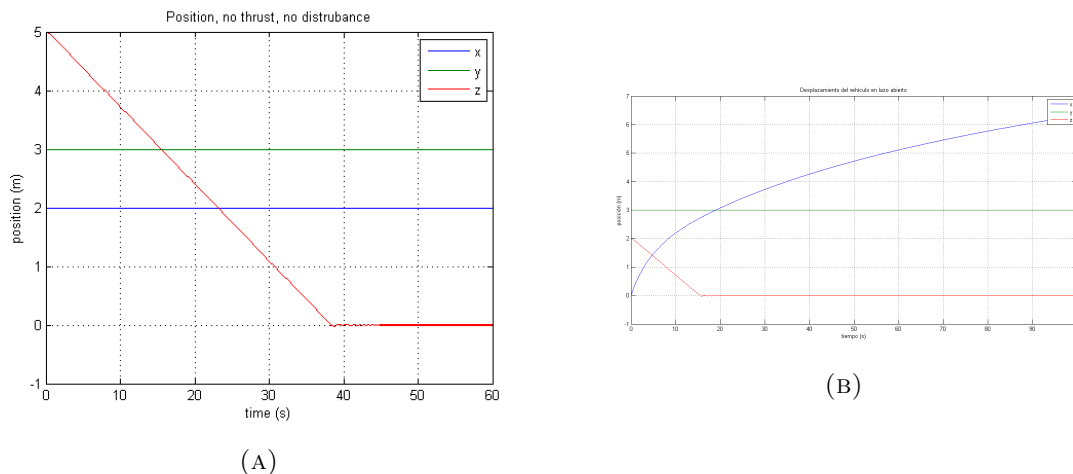
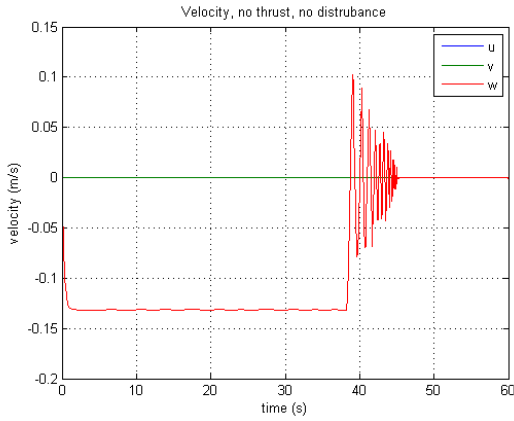
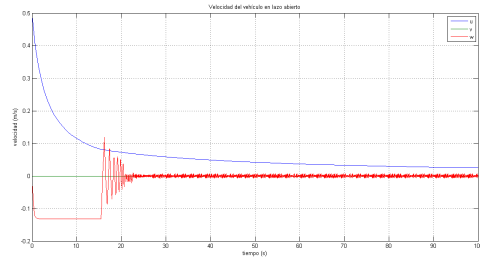


FIGURA 3.4: Simulaciones.

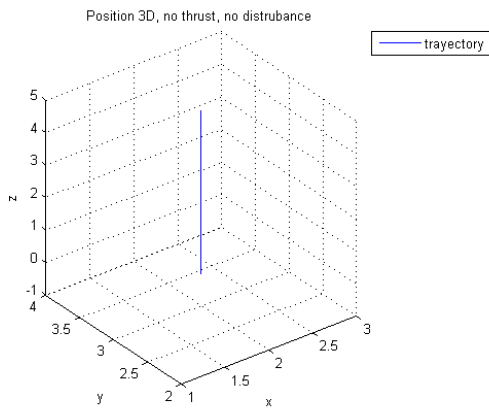


(A)

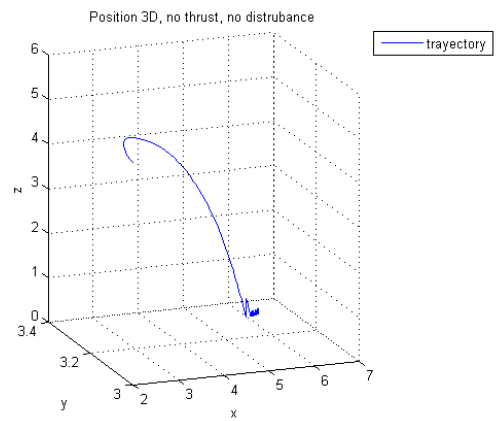


(B)

FIGURA 3.5: Simulaciones.

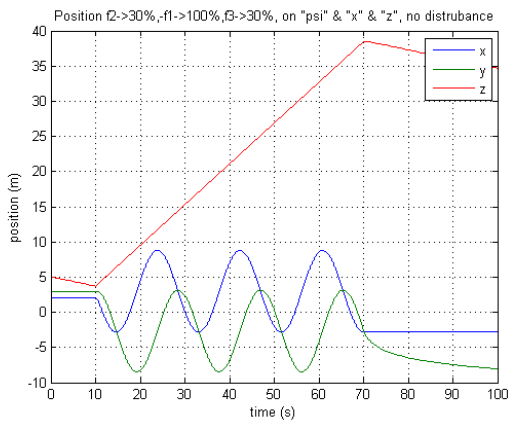


(A)

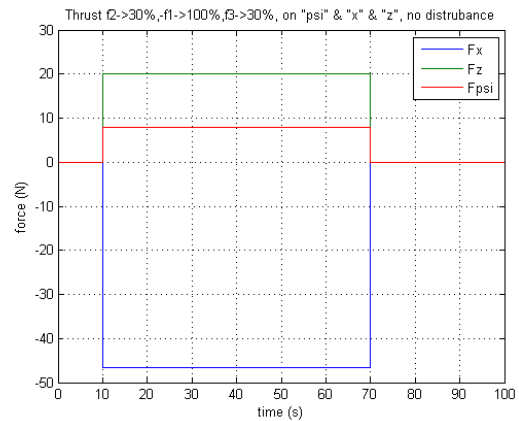


(B)

FIGURA 3.6: Simulaciones, trayectoria en 3D.



(A)



(B) Fuerza de los motores.

FIGURA 3.7: Simulaciones.

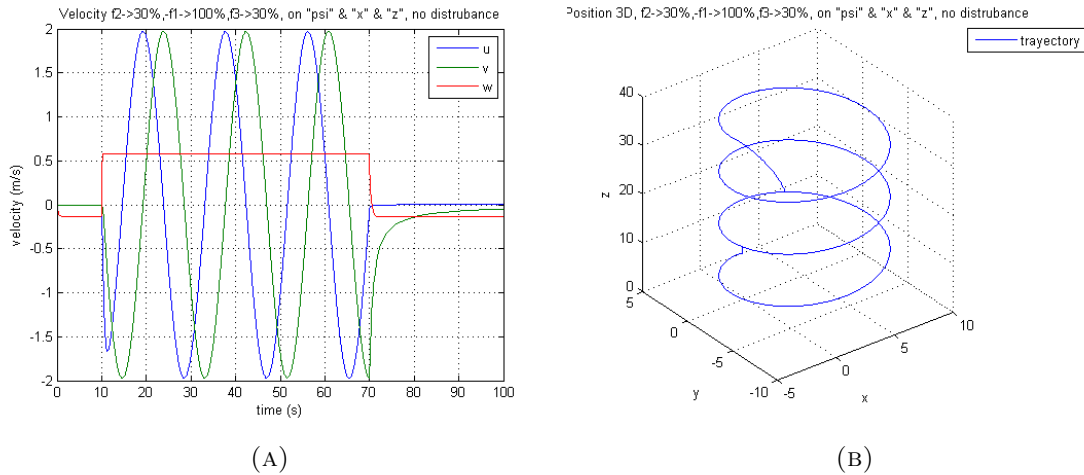
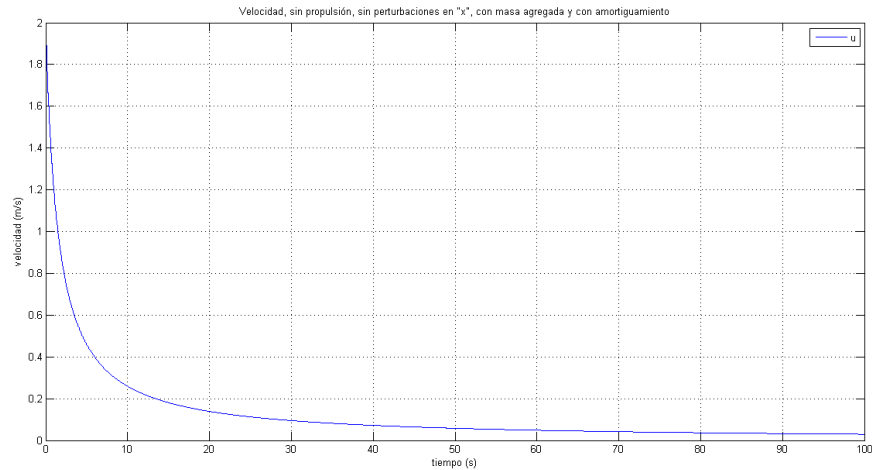


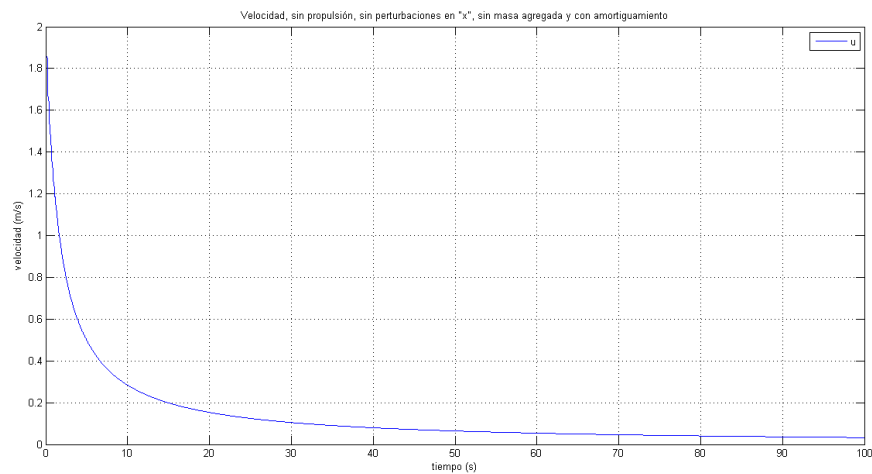
FIGURA 3.8: Simulaciones.

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.



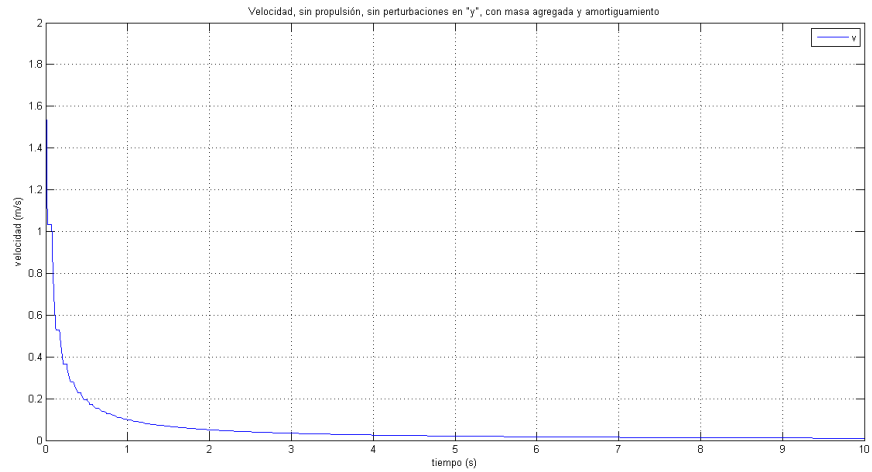
(A) Velocidad del AUV con masa agregada y con amortiguamiento



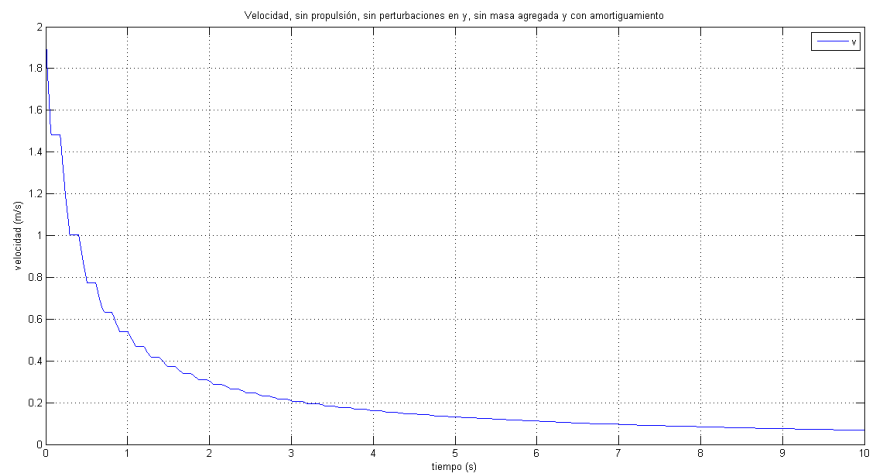
(B) Velocidad del AUV sin masa agregada y con amortiguamiento

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

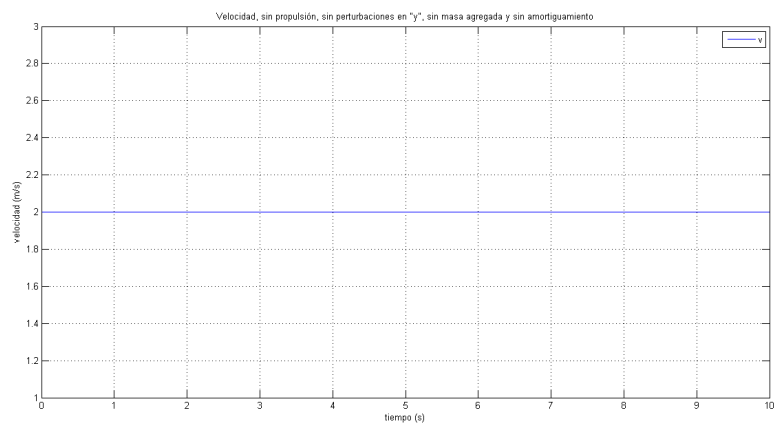
La figura 3.10 muestra la diferencia entre las velocidades en el desplazamiento a lo largo del eje y del AUV, pero eliminando también a la matriz de amortiguamiento. Con esto, se puede apreciar que al eliminar dicha matriz, no existe fuerza que haga perder energía al AUV en su desplazamiento.



(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

4.1. *Backstepping* [1]

Backstepping es un método de diseño para construir una ley de control por retroalimentación a través de una construcción recursiva de una función de control de Lyapunov (CLF, por sus siglas en inglés). El diseñador puede explotar las no-linealidades "buenas", mientras que las "malas" pueden ser dominadas, entonces puede obtenerse mayor robustez.

Tenemos que:

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

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

Teniendo nuevas variables de estado -asumiendo que la referencia de trayectorias esta dada por $\ddot{\eta}_d$, $\dot{\eta}_d$, η_d y η_d están acotadas, las referencias virtuales de trayectorias en el cuerpo y en el marco inercial están definidas por:

$$\dot{\eta}_r := \dot{\eta}_d - \Lambda\tilde{\eta}$$

$$\dot{\nu}_r := J^{-1}(\eta)\dot{\eta}_r$$

Donde: $\tilde{\eta} = \eta - \eta_d$ es el error de seguimiento.

$\Lambda > 0$ es una matriz de selección diagonal.

Sea: $s = \dot{\eta} - \dot{\eta}_r = \dot{\tilde{\eta}} + \Lambda\tilde{\eta}$

El modelo inercial es:

$$M^*(\eta)\ddot{\eta} + C^*(\nu, \eta)\dot{\eta} + D^*(\nu, \eta)\dot{\eta} + g^*(\eta) = J^{-T}(\eta)\tau$$

Por lo que se puede reescribir como:

$$M^*(\eta)\dot{s} = -C^*(\nu, \eta)s - D^*(\nu, \eta)s + J^{-T}(\eta)\tau - M^*(\eta)\ddot{\eta} - C^*(\nu, \eta)\dot{\eta} - D^*(\nu, \eta)\dot{\eta} - g^*(\eta)$$

que equivale a:

$$M^*(\eta)\dot{s} = -C^*(\nu, \eta)s - D^*(\nu, \eta)s + J^{-T}(\eta)[\tau - M\dot{\nu}_r - C(\nu)\nu_r - D(\nu)\nu_r - g(\eta)]$$

Primer paso se considera el error de la dinámica $\dot{\eta} - \dot{\eta}_d = J(\eta)(\nu - \nu_d)$

sea ν el vector de control virtual.

$$J(\eta)\nu := s + \alpha_1$$

siendo así el error de posición de la dinámica es la siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\eta}} &= J(\eta)(\nu - \nu_d) = s + \alpha_1 - J(\eta)\nu_d \\ \dot{\tilde{\eta}} &= -\Lambda\tilde{\eta} + s, \{ \alpha_1 = \dot{\eta}_r := \dot{\eta}_d - \Lambda\tilde{\eta}, \dot{\eta}_d = J(\eta)\nu_d \} \end{aligned}$$

Por tanto una función de control de Lyapunov (CFL) es:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{2}\tilde{\eta}^T K_p \tilde{\eta}, K_p = K_p^T > 0 \\ \dot{V}_1 &= \tilde{\eta}^T K_p \dot{\tilde{\eta}} = \tilde{\eta}^T K_p (-\Lambda\tilde{\eta} + s) = -\tilde{\eta}^T K_p \Lambda \tilde{\eta} + s^T K_p \tilde{\eta} \end{aligned}$$

Paso 2: se propone una función de control motivada por el pseudo-sistema de energía cinética:

$$V_2 = \frac{1}{2}s^T M^*(\eta)s + V_1, \quad M^* = (M^*)^T > 0$$

$$\dot{V}_2 = s^T \dot{M}^*(\eta)\dot{s} + \frac{1}{2}s^T \ddot{M}^*(\eta)s + \dot{V}_1$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -s^T [C^*(\nu, \eta) + D^*(\nu, \eta)] + s^T J^{-T}(\eta) [\tau - M\dot{\nu}_r - C(\nu)\nu_r - D(\nu)\nu_r - g(\eta)] \\ &+ \frac{1}{2}s^T \ddot{M}^*(\eta)s - \tilde{\eta}^T K_p \Lambda \tilde{\eta} + s^T K_p \tilde{\eta} \end{aligned}$$

Usando la propiedad simétrica *skew*: $s^T (\dot{M}^*)(\eta) - 2C^*(\nu, \eta)s = 0$

Por lo tanto queda como:

$$\dot{V}_2 = s^T J^{-T}(\eta) [\tau - M\dot{\nu}_r - C(\nu)\nu_r - D(\nu)\nu_r - g(\eta) + J^T K_p \tilde{\eta}] - s^T + D^*(\nu, \eta)s - \tilde{\eta}^T K_p \Lambda \tilde{\eta}$$

Entonces la ley de control se puede escoger como:

$$\tau = M\dot{\nu}_r + C(\nu)\nu_r + D(\nu)\nu_r + g(\eta) - J^T K_p \tilde{\eta} - J^T K_p s$$

$$\dot{V}_2 = -s^T (D^*(\nu, \eta) + K_d)s - \tilde{\eta}^T K_p \Lambda \tilde{\eta}$$

Cabe mencionar que para poder implementar este control es necesario adaptarlo a nuestra configuración de motores por lo que la relación entre el control de *backstepping* y los motores queda como sigue:

$$u = B^\dagger \tau$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & -0,5l & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_z \\ u_\psi \end{bmatrix}$$

$$f_1 = \frac{(u_x)}{2} + \frac{(u_\psi)}{2l}$$

$$f_2 = \frac{(u_x)}{2} - \frac{(u_\psi)}{2l}$$

$$f_3 = u_z$$

donde:

u_i = control *Backstepping*.

f_i = fuerza de los motores.

l = distancia al centro.

A continuación se presentan las gráficas obtenidas de la simulación del modelo incorporando el control por *backstepping*.

La figura 4.1 representa el diagrama a bloques del control, basándonos en el desarrollo antes descrito realizado por Fossen et al. 1991.

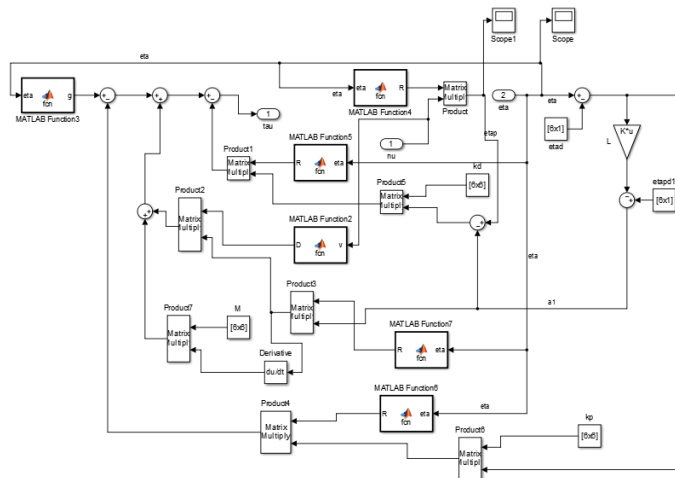
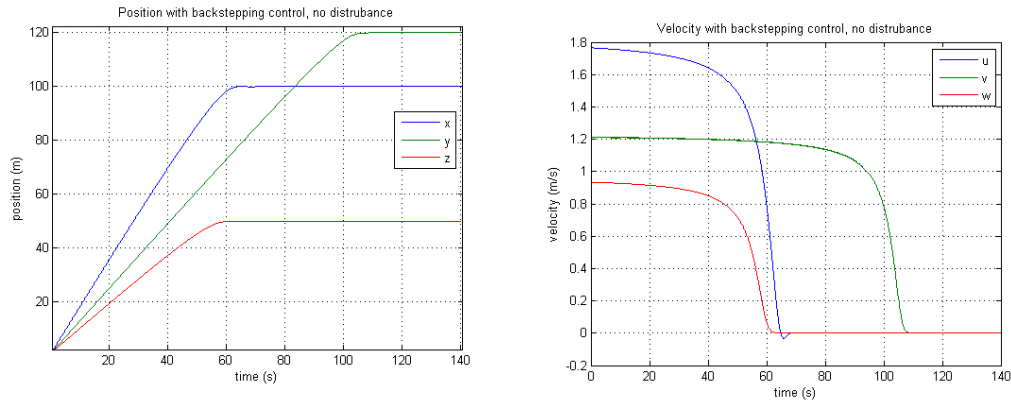


FIGURA 4.1: Diagrama a bloques en *simulink* del control *backstepping*.

Se observa en las figuras 4.2a y 4.2b que la posición converge al valor deseado $pos_d = [100, 120, 50]$ metros en ' x ', ' y ', ' z ' respectivamente y la velocidad converge a cero en cuanto dicha posición es alcanzada.



(A) Simulación de posición del AUV con valores deseados utilizando la técnica de control *Backstepping*. (B) Simulación de velocidad del AUV aplicando la técnica de control *Backstepping*.

FIGURA 4.2: Control por *Backstepping*.

4.2. Generación de trayectorias. [2]

En muchas aplicaciones de vehículos submarinos es muy importante que dicho vehículo sea capaz de seguir un camino deseado con una velocidad preestablecida (Fossen 1994,2002). El camino está definido por puntos en coordenadas cartesianas llamados *waypoints*, cada punto también puede contener información de giro como el arco de un círculo, también la velocidad del vehículo u_d está asociada a cada *waypoint*. El problema de seguir un camino (*path following*) se puede definir como dos objetivos de control (Skjetne et al. 2002). El primer objetivo es alcanzar y seguir una trayectoria o camino deseado (x_d, y_d) , a esto se refiere como problema geométrico. En este trabajo se presentará un algoritmo llamado *line of sight (LOS)* (Fossen et al. 2003) para este propósito. El camino geométrico deseado consistirá en líneas rectas segmentadas y conectadas por *waypoints*. El segundo objetivo de control es la velocidad en el eje x fijado en el cuerpo (u_d).

4.2.1. Control para vehículos acuáticos subactuados.

Seguimiento de trayectorias en *surge*, *sway* y *yaw* (3DOF) es el objetivo a alcanzar dado el diseño de nuestro vehículo. Se considerará de baja velocidad para un posicionamiento dinámico donde el vehículo estará controlado por túneles de motores acuáticos (*thrusters*), por lo tanto en este caso dos controles estarán disponibles, la cual es la configuración mínima para poder realizar seguimiento de trayectorias.

Para poder controlar el submarino se utilizara un sistema de guía (*LOS*) y un control no lineal con retroalimentación de seguimiento. La salida deseada es (x_d, y_d, ψ_d) ya que solo se considera el subsistema horizontal y no se toma en cuenta la profundidad en este caso, también se usa la velocidad lineal u_d para tener un algoritmo *LOS*. Entonces el seguimiento es alcanzado cuando $\psi(t) \rightarrow \psi_d(t)$ usando un control mientras que el otro control necesario es para la velocidad.

Un control no lineal de seguimiento sera propuesto utilizando la técnica de *Backstepping* antes mencionada. Tres funciones estabilizantes $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T$ serán definidas, donde α_1 y α_3 se encargarán de controlar *surge* y *yaw*, mientras que α_2 al ser la variable de estado que no tiene control se le asignará la dinámica resultando en un control con retroalimentación para que $\alpha_2(t) \rightarrow v(t)$ (velocidad en el eje y fijada en el cuerpo) mientras sigue el camino deseado.

4.2.2. Sistema de guía (*Line Of Sight.*)

La tarea que se debe cumplir con el algoritmo geométrico *LOS* es forzar la posición del vehículo $p = [x, y]^T$ a converger a una trayectoria o camino deseado, esto forzando el ángulo de giro ψ (*yaw*) a converger al ángulo de *LOS* [2] que esta dado por:

$$\psi_{los} = \arctan(y_{los} - y, x_{los} - x) \quad (4.1)$$

Donde la posición *LOS* $p_{los} = [x_{los}, y_{los}]^T$ es el punto a lo largo del camino al cual el vehículo debe estar apuntando.

Una segunda tarea debe ser cumplida con esta estrategia y es la tarea dinámica, la cual consiste en forzar la velocidad u a converger a una velocidad deseada u_d de tal forma que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [u(t) - u_d(t)] = 0 \quad (4.2)$$

El camino geométrico deseado es una colección de puntos (*way-points*) en una tabla. La posición de *LOS* denotada como p_{los} , está localizada en algún punto a lo largo de la línea recta que conecta el punto p_{k-1} y p_k . La posición del vehículo p será el centro de un círculo con radio n mayor al tamaño del vehículo, y este intersecta la línea entre los dos puntos,

donde p_{los} es seleccionado como el más cercano al siguiente *way point*. Para calcular p_{los} se tienen las siguientes ecuaciones con dos incógnitas:

$$(y_{los} - y)^2 + (x_{los} - x)^2 = (n)^2 \quad (4.3)$$

$$\frac{y_{los} - y_{k-1}}{x_{los} - x_{k-1}} = \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} = \tan(\alpha_{k-1}) \quad (4.4)$$

La primera ecuación es conocida como el teorema de *Pythagoras*, mientras que la segunda denota el ángulo en el cual se encuentra el punto p_{los} .

Para seleccionar puntos correctamente de la tabla se crea el criterio de círculo de aceptación, para que el vehículo vaya al punto $p_{k+1} = [x_{k+1}, y_{k+1}]^T$ a partir del punto p_k que sera el centro del radio de aceptación, como lo muestra la figura. Para que la solución exista el círculo del radio debe cumplir con lo siguiente:

$$(x_k - x(t))^2 + (y_k - y(t))^2 \leq R_k^2 \quad (4.5)$$

Las señales ψ_d , $\dot{\psi}_d$ y $\ddot{\psi}_d$ son utilizadas en el control. Para proporcionar estos datos, un modelo de referencia es implementado, esto generará las señales necesarias así como el suavizado de los puntos discontinuos y no realizará giros bruscos.

4.3. Diseño de control *Backstepping* utilizando *Line of Sight* [2]

Se considera el siguiente subsistema con 3 grados de libertad:

$$\dot{\eta} = R(\psi)\nu \quad (4.6)$$

$$M\dot{\nu} + N(\nu)\nu = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

donde $\eta = [x, y, \psi]^T$, $\nu = [u, v, r]^T$ y:

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & -\cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Las matrices M y N son definidas como:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$N(\nu) = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & n_{23} \\ 0 & n_{23} & n_{33} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

4.3.1. Diseño del control

El diseño es basado en el modelo anterior. Se definen las señales z_1 y z_2 de acuerdo con:

$$z_1 = \psi - \psi_d \quad (4.11)$$

$$z_2 = \nu - \alpha \quad (4.12)$$

donde ψ_d y sus derivadas son proporcionadas por el sistema guía, u_d es la velocidad deseada, y $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T$ es un vector estabilizante. Si definimos $h = [0, 0, 1]^T$ de tal modo que:

$$\dot{z}_1 = r - r_d = h^T \nu - r_d = \alpha_3 + h^T z_2 - r_d \quad (4.13)$$

donde $r_d = \dot{\psi}_d$ y:

$$M\dot{z}_2 = M\dot{\nu} - M\dot{\alpha} = \tau - N\nu - M\dot{\alpha} \quad (4.14)$$

Considerando la siguiente función de control de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^T M z_2, M = M^T > 0 \quad (4.15)$$

Derivando V a lo largo de las trayectorias z_1 y z_2 se tiene:

$$\dot{V} = z_1 \dot{z}_1 + z_2^T M \dot{z}_2 = z_1(\alpha_3 + h^T z_2 - r_d) + z_2^T (\tau - N\nu - M\dot{\alpha}) \quad (4.16)$$

Seleccionando el control virtual α_3 como:

$$\alpha_3 = -cz_1 + r_d \quad (4.17)$$

Por lo que sustituyendo α_3 en \dot{V} se tiene:

$$\dot{V} = -cz_1^2 + z_1 h^T z_2 + z_2^T (\tau - N\nu - M\dot{\alpha}) = -cz_1^2 + z_2^T (hz_1 + \tau - N\nu - M\dot{\alpha}) \quad (4.18)$$

Se supone que se puede asignar lo siguiente:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = M\dot{\alpha} + N\nu - Kz_2 - hz_1 \quad (4.19)$$

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

$$\dot{V} = -cz_1^2 - z_2^T K z_2 < 0 \quad (4.20)$$

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:

$$\tau_1 = m_{11}\dot{\alpha}_1 + n_{11}u - k_1(u - \alpha_1) \quad (4.21)$$

$$\tau_3 = m_{32}\dot{\alpha}_2 + m_{33}\dot{\alpha}_3 + n_{32}v + n_{33}r - k_3(r - \alpha_3) - z_1 \quad (4.22)$$

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.

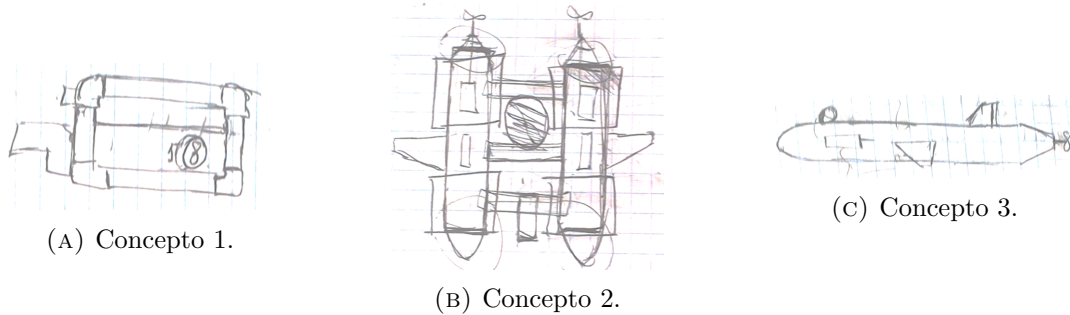


FIGURA 5.2: Diseños previos.

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.

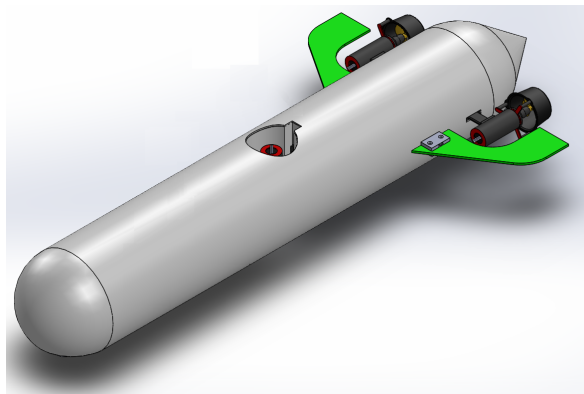


FIGURA 5.3: Diseño virtual del AUV.

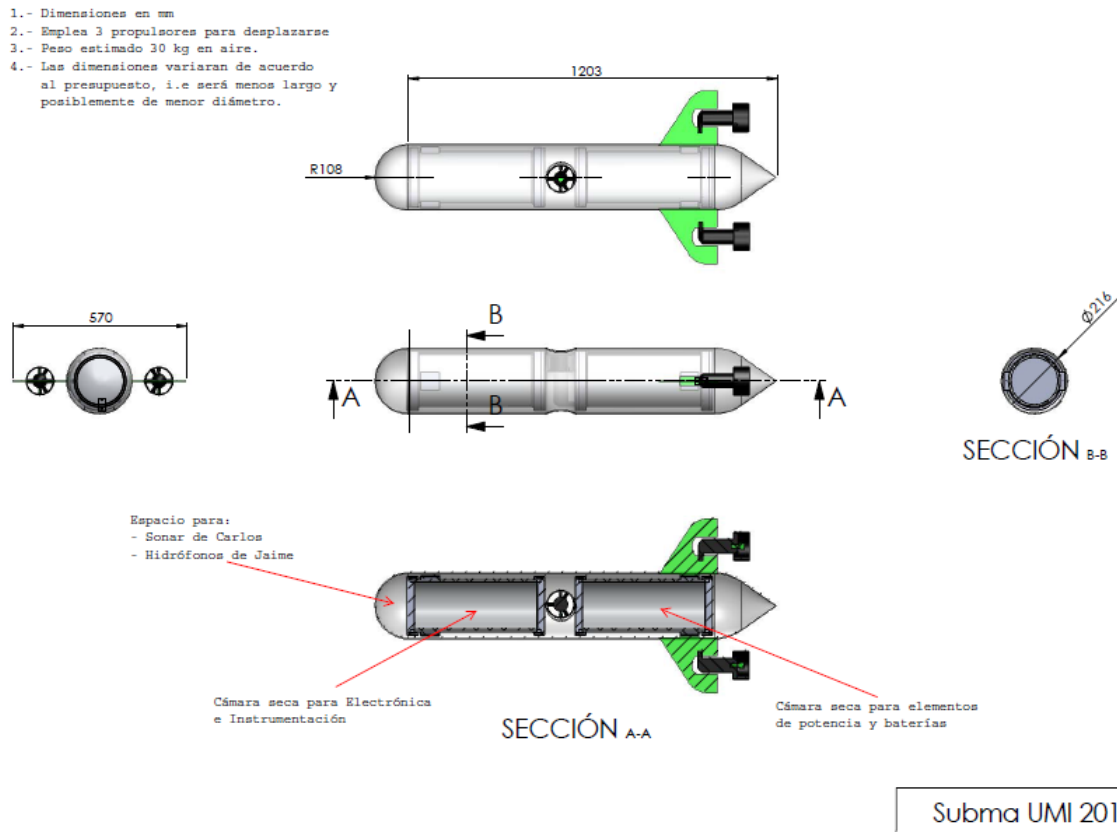


FIGURA 5.4: Virtualización del concepto 3.

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.

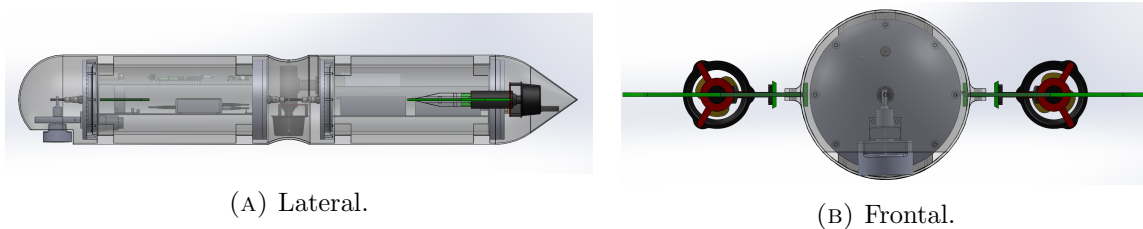


FIGURA 5.5: Dibujo del AUV en CAD.

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

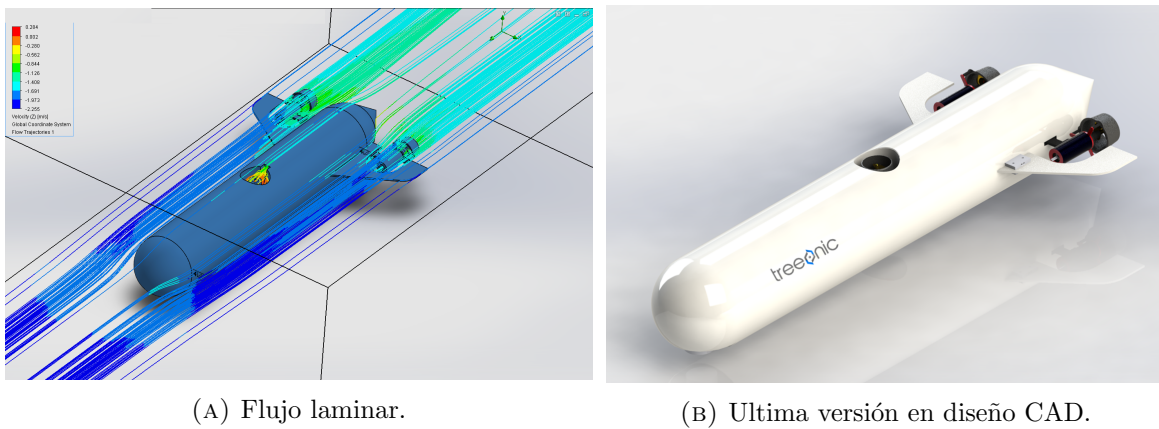


FIGURA 5.6: Dibujo CAD.

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

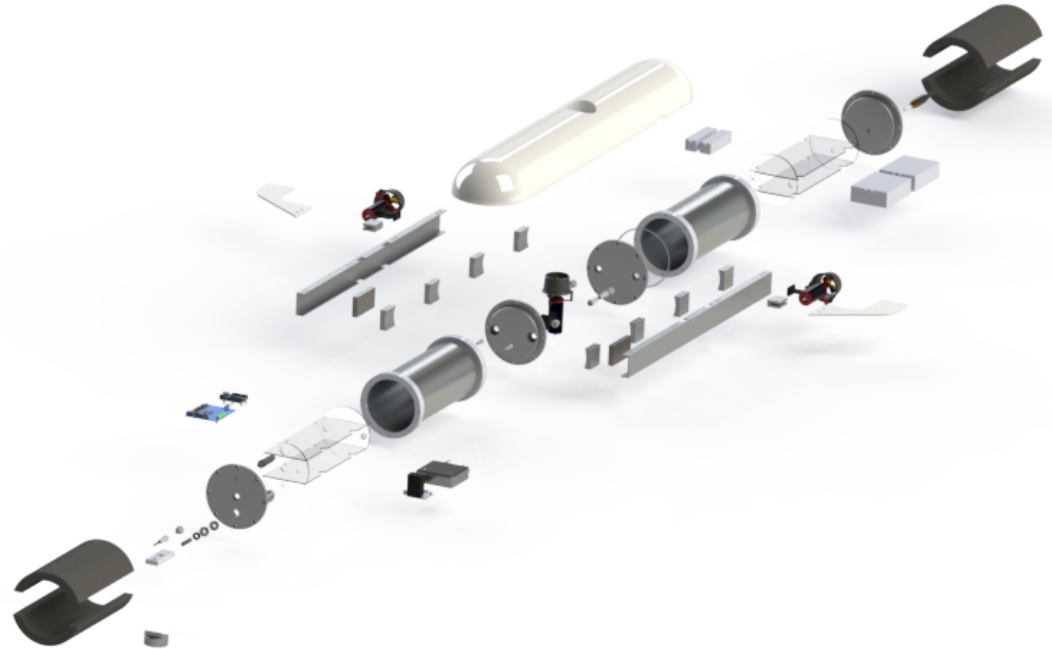


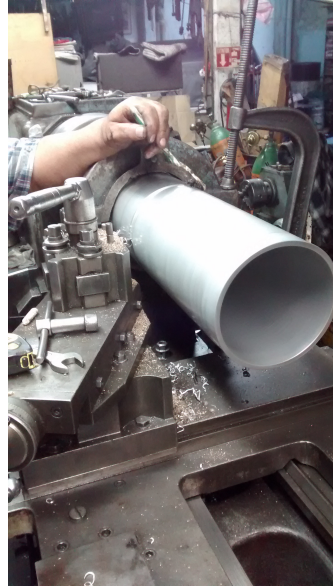
FIGURA 5.7: Diseño CAD detallado con todas sus piezas.

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.

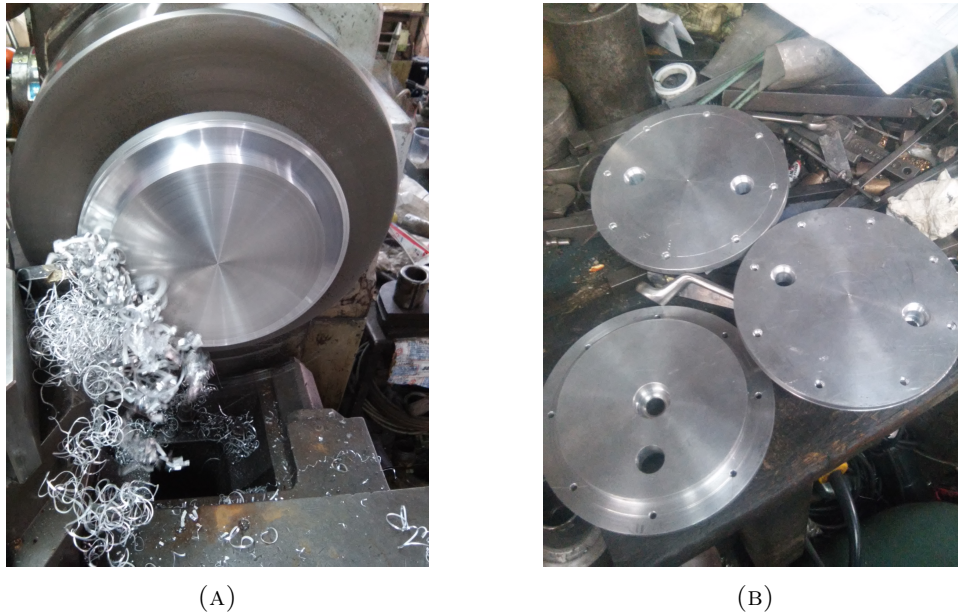


FIGURA 5.10: Manufactura de tapas.

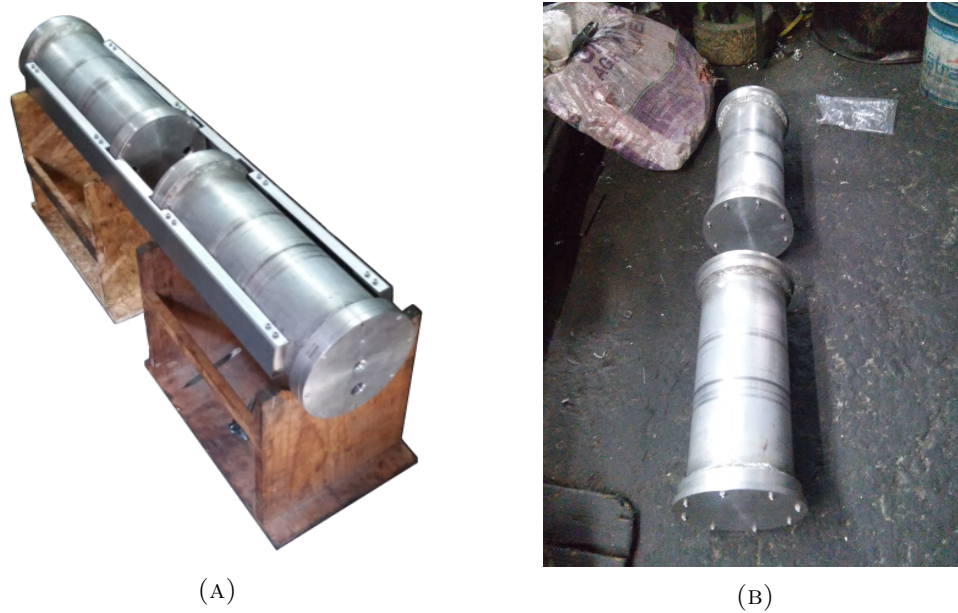


FIGURA 5.11: Estructura con los cilindros.

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.

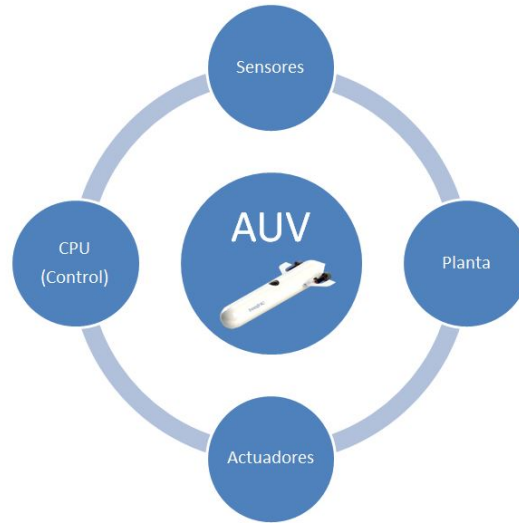


FIGURA 5.12: Diagrama del diseño del AUV.

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.

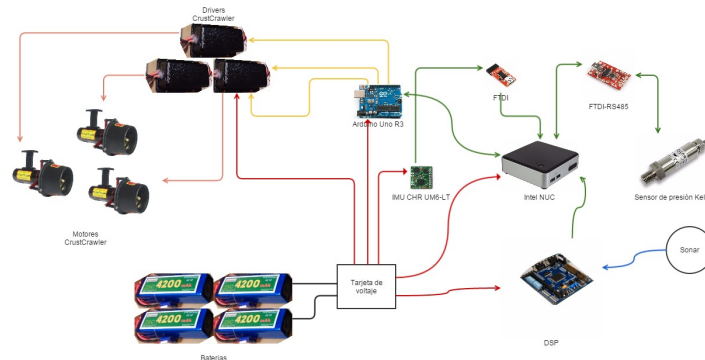


FIGURA 5.13: Arquitectura de conexiones electrónicas del AUV.

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.

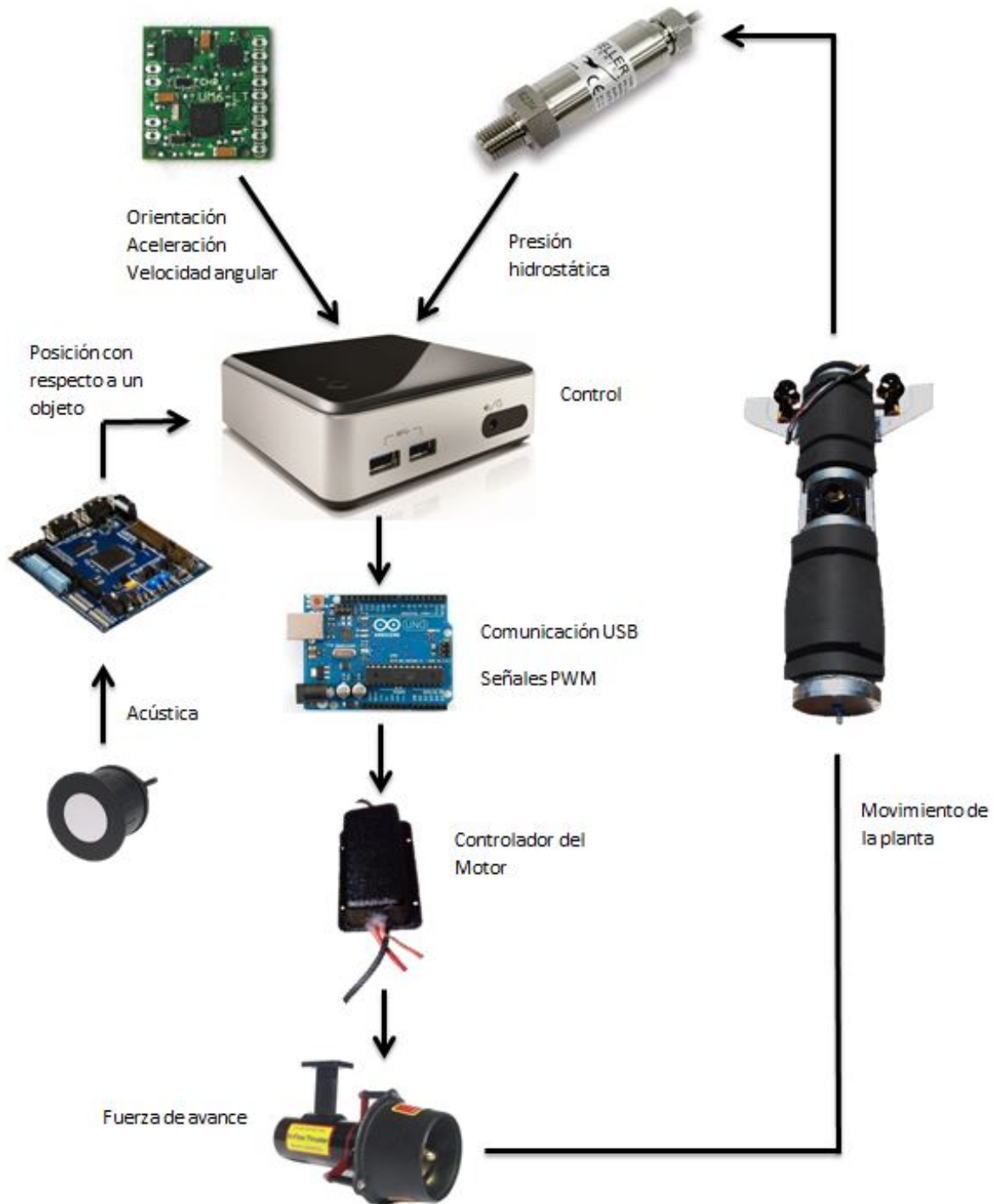


FIGURA 5.14: Arquitectura electrónica del AUV.

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 [19]. 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.

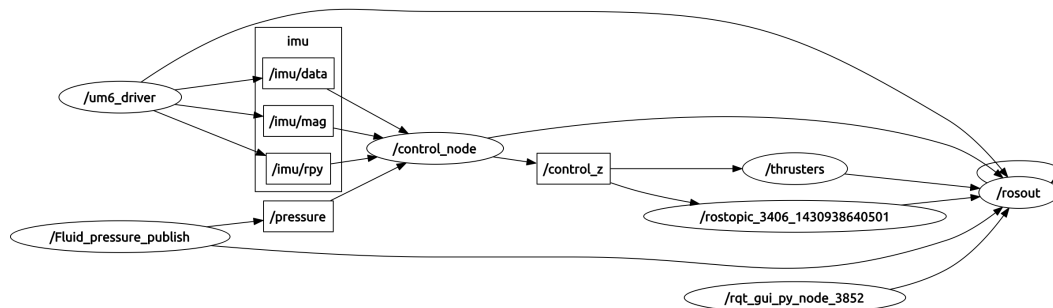


FIGURA 5.16: Esquema de nodos de ROS.

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 acusicas.



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.

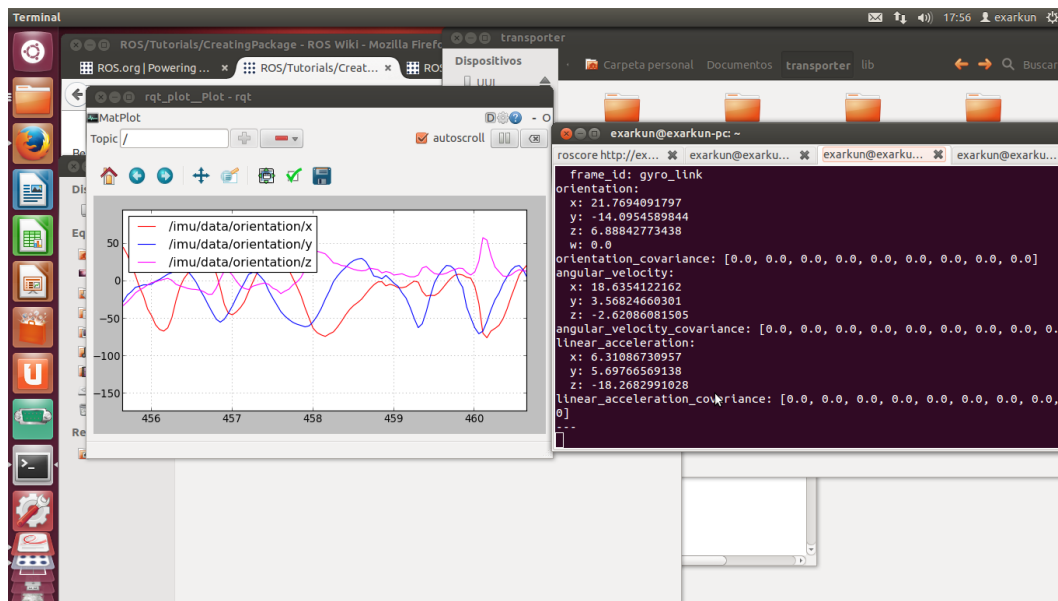


FIGURA 5.19: Gráfica de datos de la IMU MicroStrain 3DM-GX1 en ROS.

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.

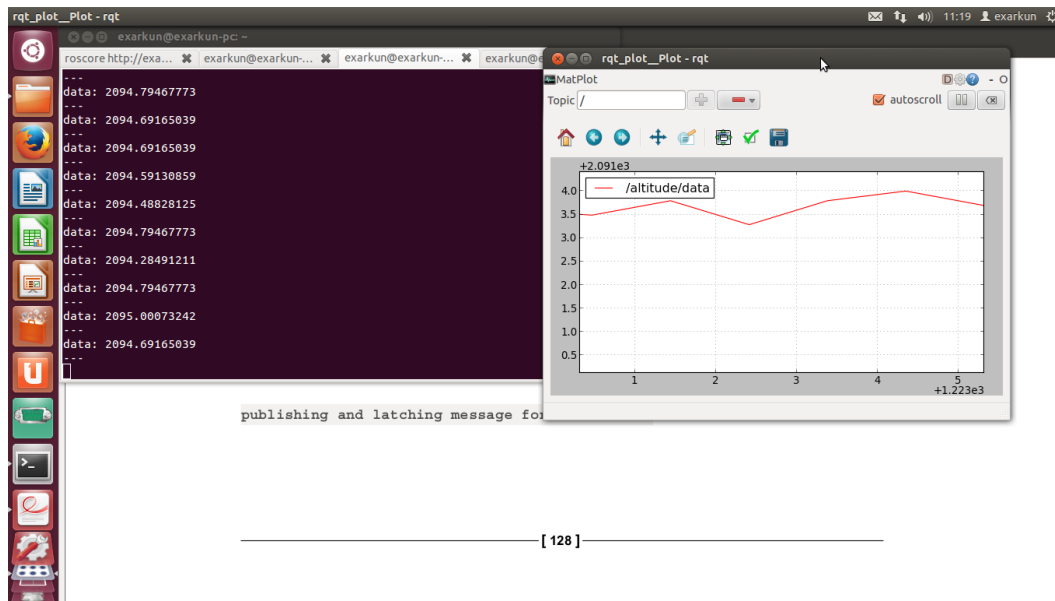


FIGURA 5.22: Grafica con los datos del sensor de presión BMP085.

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.

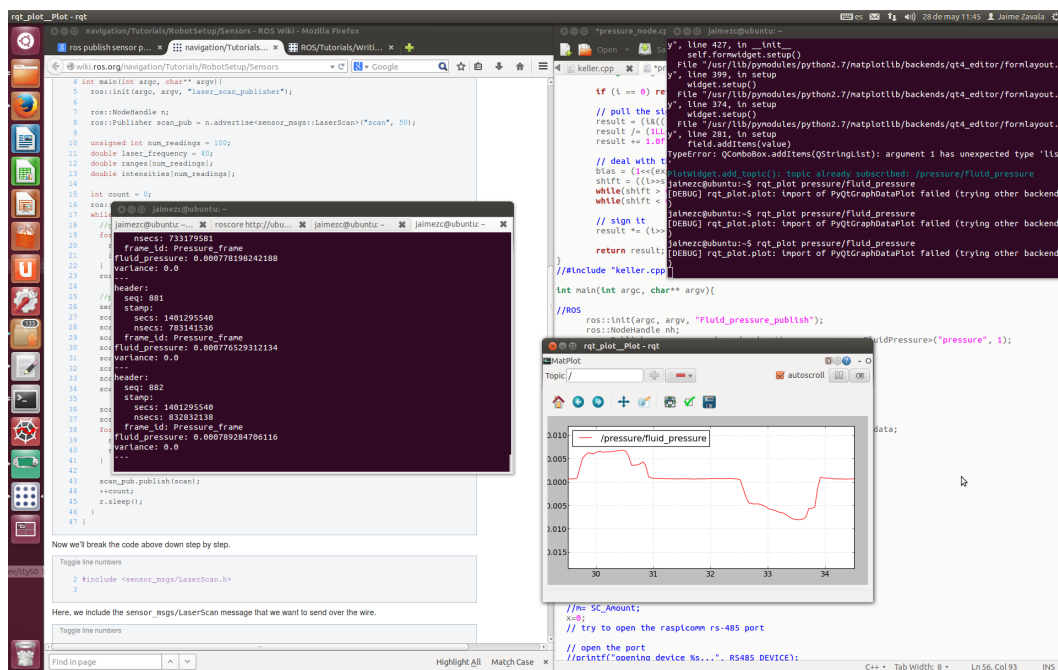


FIGURA 5.24: Gráfica de los datos del sensor de presión keller (ROS).

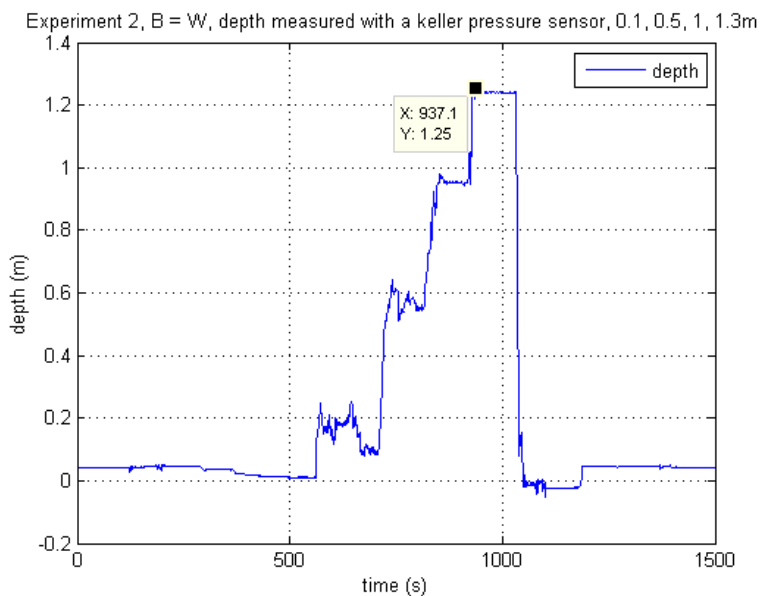


FIGURA 5.25: Gráfica con los datos del primer experimento con el sensor keller en una alberca.

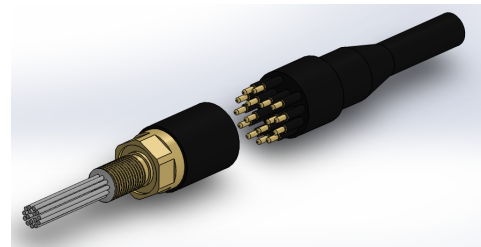
5.7.4. Comunicaciones.

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*.

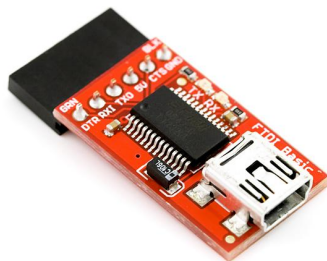


(B) Conector para agua *Seacon*

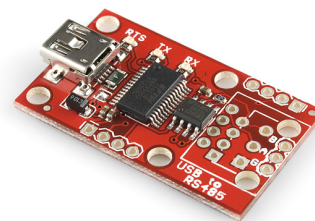
FIGURA 5.26: Conectores.

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.

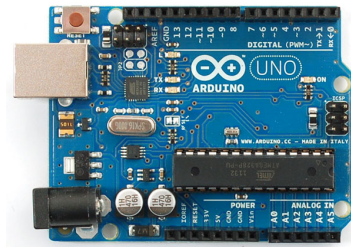


FIGURA 5.28: Arduino uno R3.

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.

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

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

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 $11,98\text{km/hr}$, 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

Resultados.

6.1. Prototipo 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. Carlos Rangel Camacho 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), 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 6.1 .

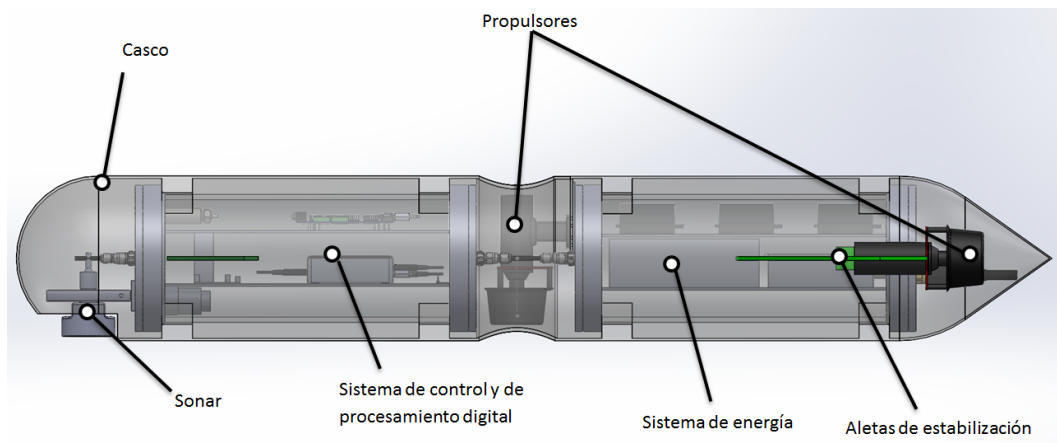


FIGURA 6.1: Componentes principales del Sx-1013.

Su configuración es de 3 motores, con los que se puede controlar *yaw* (ψ), *surge* (u) y *heave* (w) ver figura 6.2.

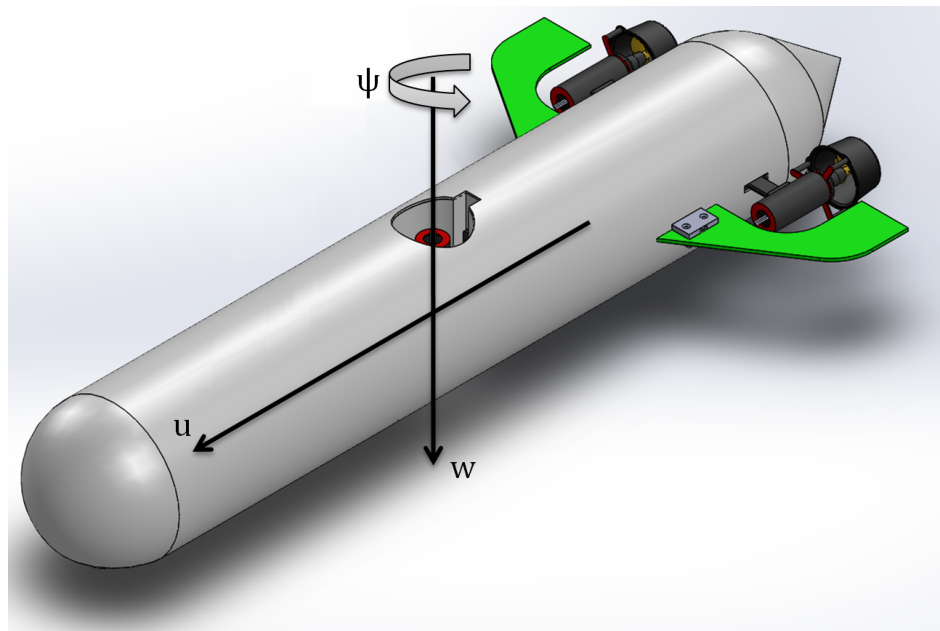
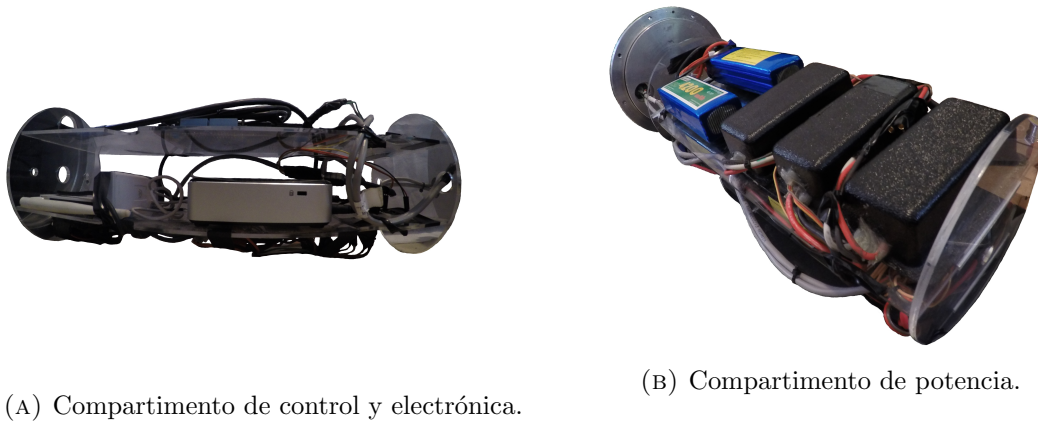


FIGURA 6.2: Ejes de movimiento del Sx-1013.

El prototipo AUV Sx-1013 consiste en la integración de los componentes electrónicos y de potencia en la estructura mecánica que se manufacturó. Este está dividido en dos cilindros que son los 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 los controles de los motores. En la figura 6.3a se muestra el interior del primer compartimiento y en la figura 6.3b se observa el interior del compartimiento de potencia.



(A) Compartimiento de control y electrónica.

(B) Compartimiento de potencia.

FIGURA 6.3: Manufactura de bridas.

El vehículo 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 6.4 se muestra el prototipo final con el que se realizaron las pruebas.



FIGURA 6.4: AUV Sx-1013 completo y funcional.

Se fabricó una carcasa de fibra de vidrio para mejorar la hidrodinámica del vehículo y que posteriormente pueda mejorar su estética, además de que protege al sensor acuático que se agregará posteriormente al diseño. La carcasa no tiene ningún material extra como alma para poder darle mayor flexibilidad. En la figura 6.5 se muestra el prototipo terminado con la carcasa de fibra de vidrio.



FIGURA 6.5: Prototipo Sx-1013 con carcasa.

6.2. Resultados experimentales.

Se implementó el control de *Backstepping* en el submarino para controlar z y yaw , y de esta manera estabilizarlo a una profundidad y orientación deseada.

En la figura 6.6, 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.

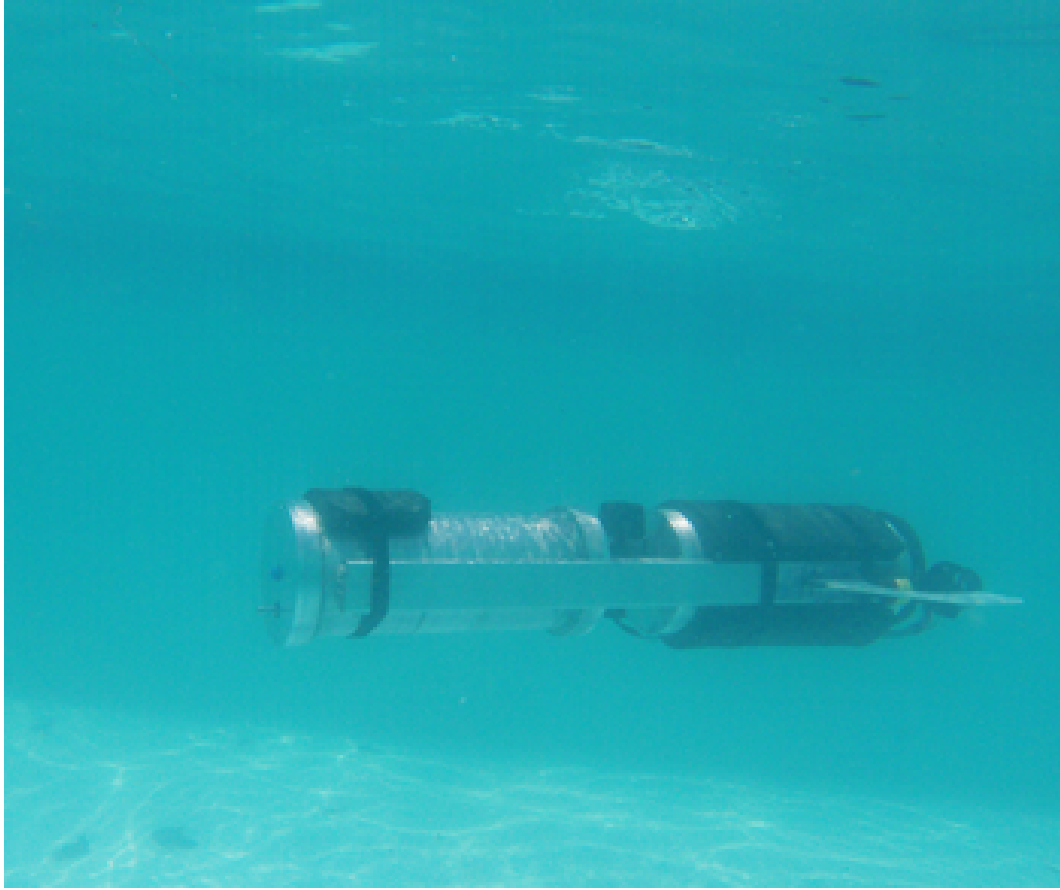


FIGURA 6.6: Profundidad deseada.

En la figura 6.7 se muestra la gráfica de la velocidad en z usando un control de *Backstepping* en donde la velocidad deseada es cero, se puede observar que por medio del control la velocidad se mantiene cerca del cero.

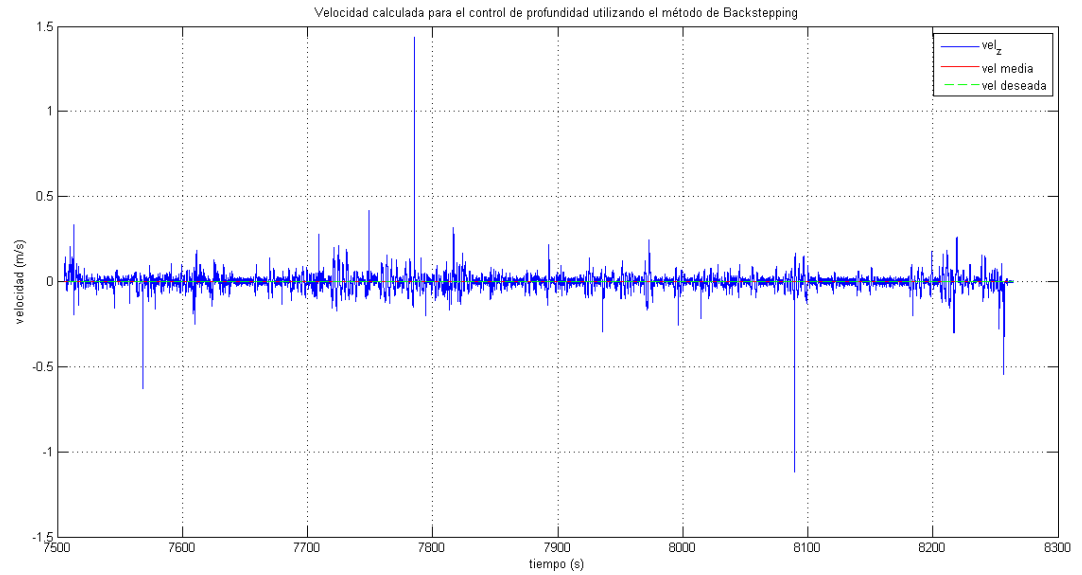


FIGURA 6.7: Velocidad en el eje z con *Backstepping*.

En la figura 6.8 se observa el comportamiento del control que mantiene el vehículo, a una velocidad deseada cerca del cero y con una profundidad deseada.

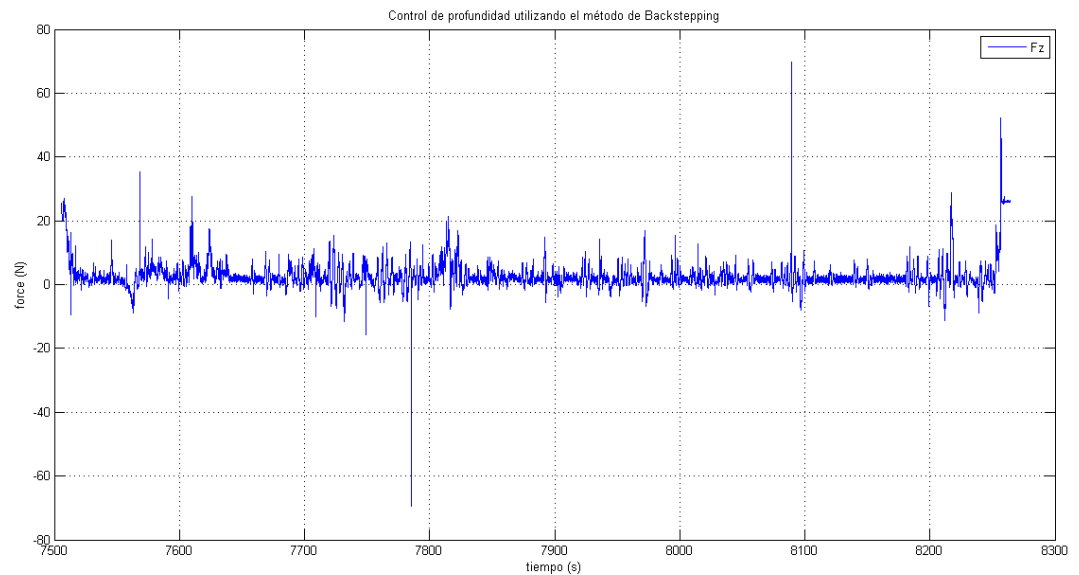


FIGURA 6.8: Control *Backstepping* en z .

En la figura 6.9 se puede apreciar la profundidad del vehículo durante una prueba real, se puede observar que el control lo mantiene cerca de la profundidad deseada.

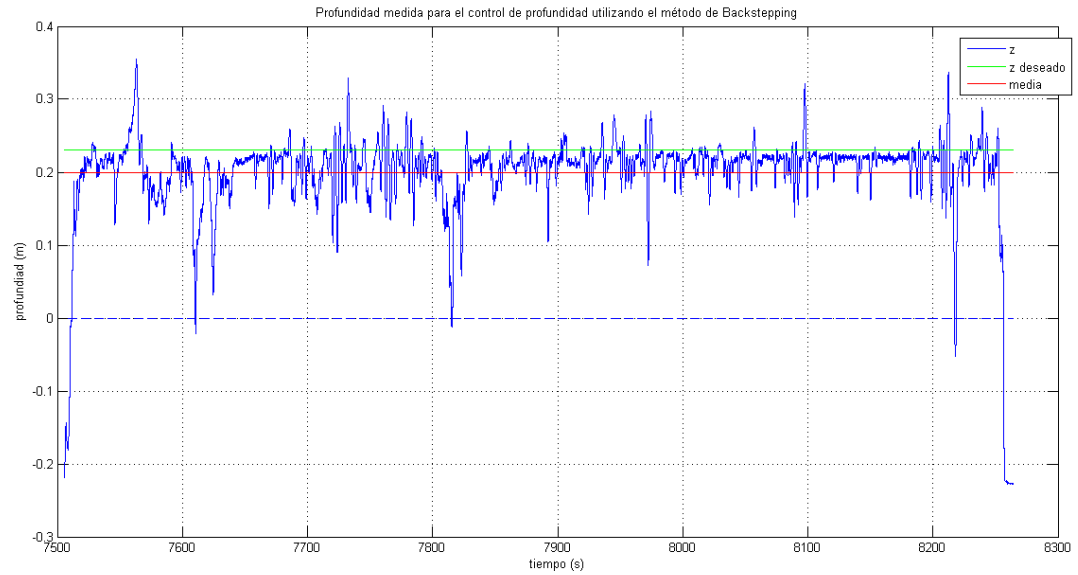


FIGURA 6.9: Gráfica de la profundidad del AUV con *Backstepping*.

En la figura 6.10 se observa la velocidad angular en *yaw* en donde el control la mantiene cerca de la velocidad deseada que es 0.

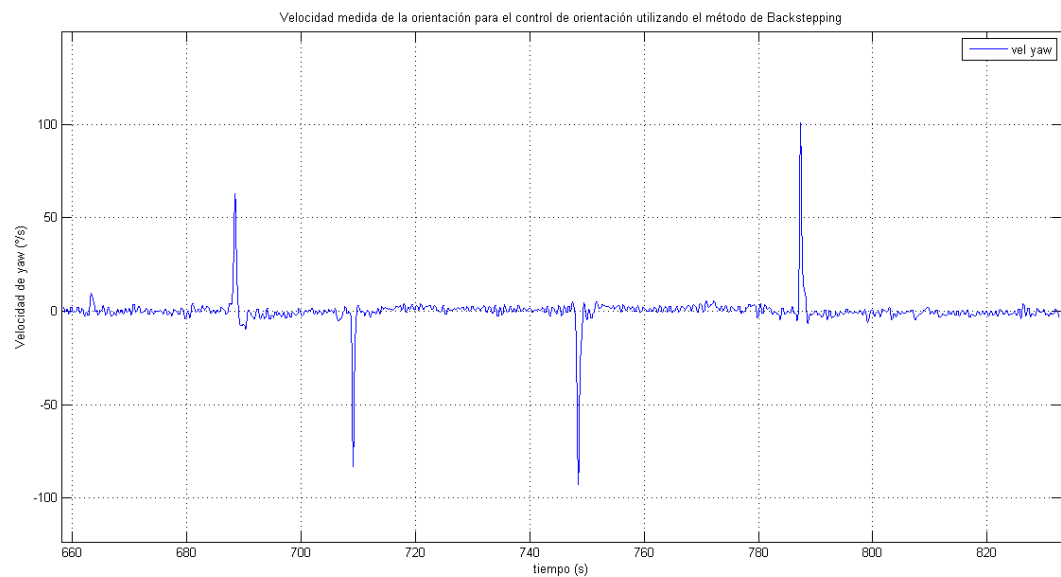


FIGURA 6.10: Velocidad angular en *yaw* con *Backstepping*.

En la figura 6.11 se muestra el control de *Backstepping* 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.

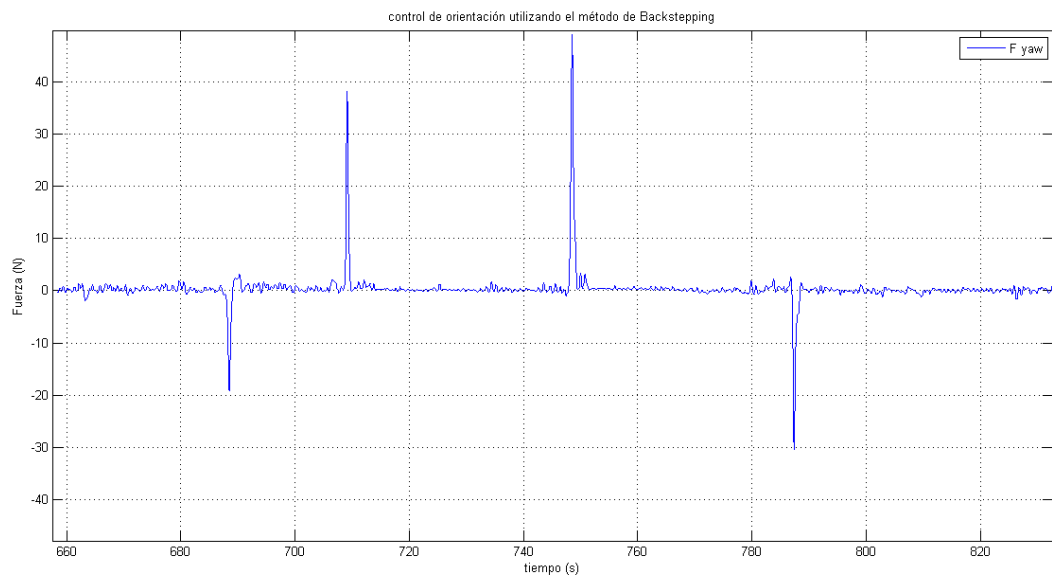


FIGURA 6.11: Control *Backstepping* en yaw.

En la figura 6.12 se observa el comportamiento del ángulo yaw durante la prueba, si bien la velocidad y el control están convergiendo, la gráfica de yaw aparentemente es mas irregular, esto debido a que los datos tardan en actualizarse y en el experimento se presentaron diversas perturbaciones constantes en el ángulo, sin darle tiempo de estabilizarse en 0, sin embargo, físicamente el vehículo siempre se orientaba al ángulo deseado.

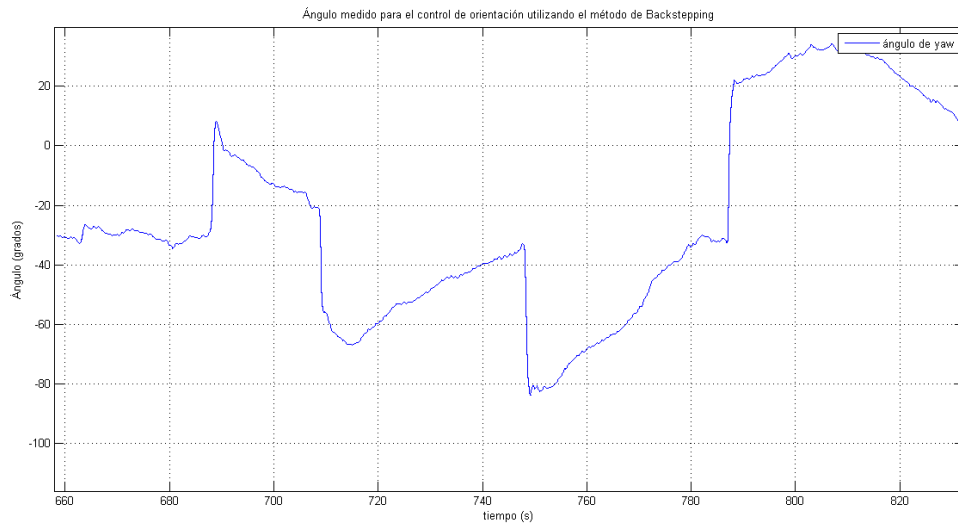


FIGURA 6.12: Orientación en yaw con *Backstepping*.

En las figuras 6.13 y 6.14 se muestra como el submarino apuntaba a 0 grados en yaw , lo que corresponde al norte magnético es decir, el sur de la tierra. Siendo este el comportamiento deseado.



FIGURA 6.13: AUV con una orientación de yaw a cero grados

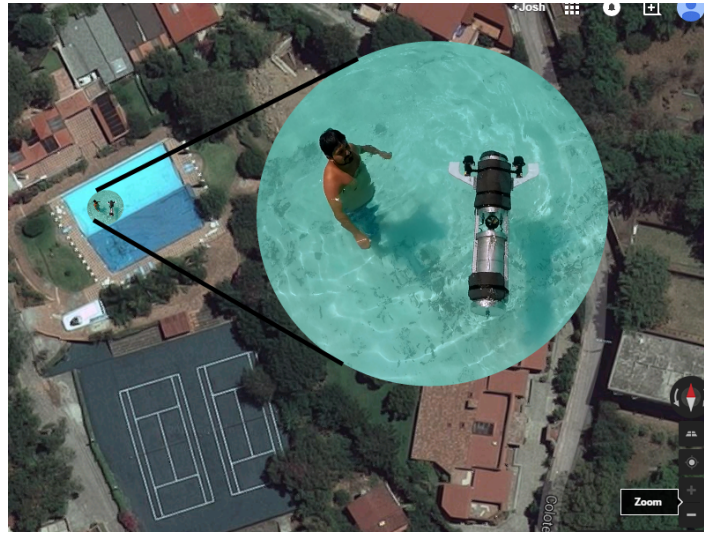


FIGURA 6.14

Capítulo 7

Conclusiones y Perspectivas

Conclusiones.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que el diseño mecánico del Sx-1013 proporcionó la hermeticidad indispensable para no poner en riesgo o dañar los componentes electrónicos, de la misma manera permitió tener un buen comportamiento hidrodinámico. Se realizó el modelo matemático del AUV Sx-1013, lo que permitió hacer las simulaciones de su comportamiento y de la ley de control. También se pudieron probar diversos controles con esta configuración, esto permitió entender que el movimiento en x, y y yaw está acoplado. El óptimo diseño electrónico del prototipo Sx-1013 fue necesario para que el control pudiera actuar en el sistema. Con el control de *Backstepping* fue posible estabilizar la profundidad y orientación del vehículo con tan solo un sensor de presión y una central inercial.

Perspectivas.

El prototipo Sx-1013 es un AUV funcional con potenciales aplicaciones civiles y académicas que necesita algunas reestructuraciones y desarrollo de trabajo posterior para lograr alcances mayores. Algunas de las modificaciones e implementaciones que se le pueden hacer son:

- Hacer mas práctico el proceso de armado.
- Implementar sistema de localización
- Implementar *line of sight*.

- Implementar tanques de lastres.
- Poner timones y aletas controladas por servo motores.
- Agregarle mas sensores para navegación.
- Implementar filtro de *Kalman*.
- Implementar algoritmos para concurso.
- Agregar botón de encendido.
- Agregar sistema de hidrófonos.
- Agregar sonar con barrido.

Bibliografía

- [1] Thor I. Fosen. *Marine Control Systems*. John Wiley and Sons, University of Trondheim, Norway, 2002.
- [2] Skjetne R. Fossen T., Breivik M. Line of sight path following of underactuated marine craft. *University of Science and Technology (NTNU)*, .(7491):., . 2003. URL [N/A](#).
- [3] Batlle C. González J., Gomáriz S. Modelo matemático y control difuso para el seguimiento de trayectorias del auv cormorán. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial.*, 47(.):1–9, . 2013. URL [N/A](#).
- [4] Gordon R. Ebbeson Carmen Lucas Derek Clark Nicos Pelavas, Garry J. Heard. Acoustic localization of an autonomous underwater vehicle. *Defence R and D Canada - Atlantic, 9 Grove St., Dartmouth NS, Canada*, 37(3):110–111, . 2009. URL [N/A](#).
- [5] Curcio J. Benjamin M. Roper C. Curtin T., Crimmins D. Autonomous underwater vehicles: Trends and transformations. *Marine Technology Society Journal.*, 39(3):., . 2005. URL [N/A](#).
- [6] Norwegian Defense Research Establishment. Hugin world class military auv. *Forsvarets Forskningsinstitutt.*, .(.):., June 2013. URL <http://www.ffi.no>.
- [7] Budiyo A. Advances in unmanned underwater vehicles technologies: Modeling, control and guidance perspectives. *Indian Journal of Marine Sciences.*, 38(3)(.):282–295, . 2009. URL [N/A](#).
- [8] Ichikawa T. Yamauchi Y Wakita N., Hirokawa K. Development of autonomous underwater vehicle (auv) for exploring deep sea marine mineral resources. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 47(3):., . 2010. URL [N/A](#).

-
- [9] 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](#).
- [10] Jose Guivant Michael Stevens Tim Bailey, Juan Nieto and Eduardo Nebot. Consistency of the ekf-slam algorithm. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 62(15):3562–3568, October 2006. URL <http://link.aip.org/link/?RSI/62/1/1>.
- [11] Naval Meteorology Commander and Oceanography Command. *Review of Autonomous Underwater Vehicle AUV Developmments*. Published by the author, Stennis Space Center, YEAR=2001.
- [12] Drake T. Bingham D. The application of autonomous underwater vehicle (auv) technology in the oil industry- vision and experiences. *Washington, D.C USA*, .(.):., . 2002. URL [N/A](#).
- [13] Keith Vickery. Acoustic positioning systems a practical overview of current systems. *IEEE*, .(.):., . 1998. URL [N/A](#).
- [14] Mae Seto Liam Paull, Sajad Saeedi and Howard Li. Auv navigation and localization: A review. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, 39(1):., January 2014. URL [N/A](#).
- [15] P. Oliveira A. Alcocer and A. Pascoal. Underwater acoustic positioning systems based on buoys with gps. *Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 8th ECUA*, .(.):12–15, . 2006. URL [N/A](#).
- [16] Thor I. Fosen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and Sons, University of Trondheim, Norway, 1994.
- [17] Thor I. Fosen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley and Sons, University of Trondheim, Norway, 1994.
- [18] Sighard F. Hoerner. *Fluid-Dynamic Drag*. Published by the Autor, USA, 1965.
- [19] Enrique Fernandez Aaron Martinez. *Learning ROS for Robotics Programming*. PACKT Publishing, Brimingsm-Mumbai, YEAR=2013.