

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN PARA UN
VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el bachiller:

Christian Giovanni Zevillanos Begazo

ASESOR: Mag. Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda

Lima, julio del 2015

RESUMEN

Actualmente, es preocupante que el Perú invierta solo el 0.15% del PBI para la investigación y desarrollo tecnológico considerando que el promedio en América Latina es de 0.7% [1]. Es por ello, la importancia de ser un país que no solo exporte materia prima, sino también conocimientos y nuevas tecnologías [2]. Esta tendencia nacional influye en los diferentes sectores empresariales, en este caso, innovación y desarrollo para el uso de vehículos subacuáticos autónomos (AUV).

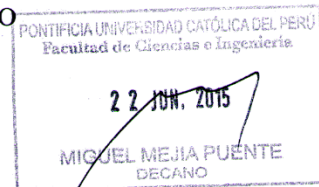
Por tal motivo, se presenta el diseño de un sistema de estabilización para un AUV, el cual es capaz de estabilizar los giros en el eje Y (pitch), los giros en el eje Z (yaw) y la profundidad. Este sistema permite que el AUV mantenga el vector dirección y la profundidad dados por el módulo generador de trayectoria existente en el sistema, controlando así los motores de los timones verticales y horizontales ubicados en la cola del AUV. Esto se logra por medio de un controlador PID, el cual se conseguirá por medio de la simulación de un modelo matemático con los parámetros propios del vehículo.

FACULTAD DE
 CIENCIAS E
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ

**TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR
 EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : DISEÑO DE UN SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN PARA UN
 VEHICULO SUBMARINO AUTONOMO
 Asesor : Mag. Roberto Furukawa
 Alumno : Christian Giovanni Zevillanos Begazo
 Código : 20097210
 Tema N° : 107
 Fecha : 15/06/2015


Descripción y Objetivos

La investigación y desarrollo tecnológico en el Perú es un tema de preocupación nacional, ya que el país invierte solo el 0.15% del PBI a esta área, considerando que el promedio en américa latina es de 0.7%. Esta iniciativa responde a la preocupación de ser un país que además de exportar materia prima, lo haga también en conocimiento y nuevas tecnologías. Esta tendencia nacional influye en los diferentes sectores empresariales, en este caso, innovación y desarrollo para el uso de vehículos subacuáticos autónomos (AUV).

Por ello, se presenta el diseño de un sistema de estabilización para un AUV, el cual es capaz de estabilizar los giros en el eje Y (pitch), los giros en el eje Z (yaw) y la profundidad. Este sistema permite que el AUV mantenga el vector dirección y la profundidad dados por el módulo generador de trayectoria existente en el sistema, controlando así los motores de los timones verticales y horizontales ubicados en la cola del AUV. Esto se logra por medio de un controlador PID, el cual se conseguirá por medio de la simulación de un modelo matemático con los parámetros propios del vehículo.

MAXIMO : 100 paginas



27
 Roberto Furukawa





*A mis padres, a quienes les debo mi formación personal
y profesional. Con mi gratitud, cariño y admiración.*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todo el apoyo y aliento durante toda mi vida, y en especial en esta etapa universitaria. A mi hermano, por su comprensión y ayuda en momentos de ausencia. Y a todos mis compañeros, y buenos amigos, que me supieron apoyar en todo momento, y alentar en los momentos complicados.

Agradezco en particular, al personal del INACOM, por la orientación, apoyo y consejos para la realización de las simulaciones realizadas y a las facilidades en el uso del laboratorio.



INICIO

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación de la problemática	2
1.2. Estado del arte	3
1.3. Objetivos	7
1.4. Requerimientos del sistema	7
1.5. Metodología y Plan de trabajo	8
CAPITULO 2. DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO	10
2.1. Estructura de Funciones	11
2.2. Matriz Morfológica	14
2.3. Conceptos de solución	16
2.4. Evaluación de soluciones	19
2.5. Presentación del concepto óptimo	21
2.6. Elemento de soporte de Hardware	24
2.7. Diagrama de componentes eléctricos	25
2.8. Diagrama de flujo del sistema	28
2.9. Modelo Matemático del sistema	31
CAPITULO 3. PRUEBAS Y RESULTADOS	36
3.1. Simulaciones de control	37
3.2. Análisis de vibración	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: AUV “MARES”.....	4
Figura 1.2: “REMUS 600-S”.....	4
Figura 1.3: “STARBUG”.....	4
Figura 1.4: “Puma and Jaguar”.....	5
Figura 1.5: Calendario de trabajo.....	9
Figura 2.1: Estructura de funciones- caja negra.....	11
Figura 2.2: Diagrama de Funciones.....	13
Figura 2.3: Vistas del Primer concepto solución.....	16
Figura 2.4: Vistas del Segundo concepto solución.....	17
Figura 2.5: Vistas del Tercer concepto solución.....	18
Figura 2.6: Gráfica del consolidado de la Evaluación técnico-económica.....	21
Figura 2.7: Torpedo Mk44.....	22
Figura 2.8: AUV REMUS 600 - S.....	23
Figura 2.9: Arreglo mecánico de soporte de hardware.....	24
Figura 2.10: Disposición real de componentes analógicos.....	24
Figura 2.11: Diagrama de componentes del AUV.....	26
Figura 2.12: Diagrama de flujo general.....	28
Figura 2.13: Diagramas de flujos iniciales, Activar AUV y Configurar vector.....	29
Figura 2.14: Diagrama de flujo de la estabilización de rumbo.....	30
Figura 2.15: Sistema de referencia inercial y del cuerpo rígido.....	31
Figura 3.1: Modelo del AUV. Respuesta natural.....	39
Figura 3.2: Resultados de la simulación: Posición y ángulo.....	40
Figura 3.3: Resultados de la simulación: Velocidades lineales y angulares.....	40
Figura 3.4: Planta controlada por PID en pitch.....	41
Figura 3.5: PID obtenido mediante iteraciones.....	42
Figura 3.6: Angulo deseado pitch, ángulo del móvil (θ).....	42
Figura 3.7: Comportamiento de la aleta de profundidad (δ_s).....	43
Figura 3.8: Arreglo mecánico de soporte de tarjetas.....	44
Figura 3.9: Resultado del primer modo de vibración.....	46
Figura 3.10: Resultado del segundo modo de vibración.....	46
Figura 3.11: Resultado del tercer modo de vibración.....	46
Figura 3.12: Resultado del cuarto modo de vibración.....	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Cuadro resumen de características de AUVs.....	6
Tabla 2.1: Matriz morfológica.	14
Tabla 2.2: Evaluación criterios técnicos.	19
Tabla 2.3: Evaluación criterios económicos.	20
Tabla 2.4: Consolidado de las soluciones planteadas y normalizadas.	20
Tabla 2.5: Notación general de vehículos marinos.	31
Tabla 3.1: Coeficientes de fuerzas del AUV REMUS- Parámetros no lineales.....	37
Tabla 3.2: Coeficientes de momentos del AUV REMUS- Parámetros no lineales ..	37
Tabla 3.3: Frecuencias correspondientes a cada modo de vibración.	45



A large, light gray watermark of the university logo is centered on the page. It features the Latin motto "LUX IN TENEBRIS LUCET" at the top and "MCMXVII" at the bottom, surrounding a central emblem of a ship on waves with a star above it.

CAPITULO 1.
INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirá la problemática y las razones que originan el desarrollo de este tema de tesis. Además, se mostrará una breve descripción del estado del arte referente a los AUV's. Finalmente, se planteará el desarrollo del presente trabajo, se mencionan los objetivos y requerimientos del sistema como la metodología utilizada junto con el cronograma de trabajo.

1.1. Presentación de la problemática

La investigación y desarrollo tecnológico en el Perú es un tema de preocupación nacional, ya que el país invierte solo el 0.15% del PBI a esta área, considerando que el promedio en América Latina es de 0.7% [1]. Esta iniciativa responde a la preocupación de ser un país que no solo exporte materia prima sino también conocimiento y nuevas tecnologías [2]. Esta tendencia nacional influye en los diferentes sectores empresariales, en este caso, innovación y desarrollo para el uso de vehículos subacuáticos autónomos (AUV).

Este trabajo está orientado a la actualización del sistema de estabilización de vehículos subacuáticos no tripulados, AUV por sus siglas en inglés, que posean un sistema de control analógico. Hay factores que alteran la estabilización del AUV cuando este realiza la maniobra designada en rumbo hacia el objetivo. Tales como el propio peso del vehículo, la marea, la corriente del mar, el rolido y el cabeceo, entre otros.

El AUV es un sonar dirigido, ya que es un sistema independiente y autónomo que solo cuenta con la dirección del objetivo. Cuando este se encuentra cerca del punto de contacto debe detectar el objetivo de forma precisa por medio del sistema de sonar en el AUV, ejecutando una maniobra de zigzag, para un vez detectado fijar el rumbo. Este proceso lo realiza sin ninguna maniobra por parte de los submarinistas, por ello el AUV debe asegurar que el rumbo, profundidad y virado que necesite, ejecutando las maniobras descritas sean las correctas para no desviarse ni perder al objetivo.

Por ello, es vital para el correcto seguimiento de las instrucciones del control interno, que los actuadores respondan de manera continua y precisa para que este no se desestabilice y pierda total control. En este sentido, se propone utilizar un sistema de control PID que sea capaz de mantener las órdenes y tener el mínimo error posible al objetivo a pesar de las perturbaciones propias del medio y del dispositivo.

1.2. Estado del arte

El AUV es un vehículo submarino no tripulado utilizado, principalmente, en tres grandes áreas, investigación, industria petrolera y actividad militar. Por ejemplo, en el área de investigación es utilizado para el estudio del lecho marino para prevenir accidentes con embarcaciones comerciales y recreacionales [3] y también para el monitoreo y cuidado ambiental de la fauna y flora submarina [4]. En la industria petrolera, los AUVs son utilizados para el estudio topológico submarino necesarios para la extracción y diseño de la infraestructura de tuberías, como también para supervisión y mantenimiento de dicha infraestructura. [5]. En la actividad militar, los AUVs son utilizados para inteligencia, vigilancia y reconocimiento, inspección e identificación oceanográfica y guerra antisubmarina [6].

Existen dos diseños de AUVs, los de tipo torpedo y no-torpedo, cada uno con características resaltantes para la aplicación deseada. Los de tipo torpedo, son de forma alargada, con el propulsor y los timones en la parte trasera, poseen altas velocidades, y soportan altas corrientes. Por ello, estos se utilizan en baja profundidad y para recorrer grandes distancias para mediciones topológicas de baja resolución. Cabe resaltar que el control de estos vehículos es ligeramente más complicado, ya que poseen seis grados de libertad dependientes entre sí. Al contrario, los de tipo no torpedo, suelen ser de mayor volumen, cuentan con varios propulsores, son de baja velocidad y no soportan altas corrientes. Esto conlleva, a que sean especialmente utilizados en áreas pequeñas, pero con gran maniobrabilidad, para fotografías y mediciones topológicas de alta resolución. En este caso, debido a su forma, poseen dos grados de libertad independientes lo que facilita su control [7].

Entre los AUVs de tipo torpedo se puede encontrar al “MARES” [Figura 1.1] de la Universidad de Porto en Portugal, de 1.5 m de largo y 32 kg. Este vehículo está diseñado para el estudio ambiental de la zona costera hasta 100 m de profundidad con una velocidad de 2 m/s. Posee dos propulsores verticales y dos horizontales, sensores de presión, inclinación, compás digital y sistema acústico (LBL). [8]

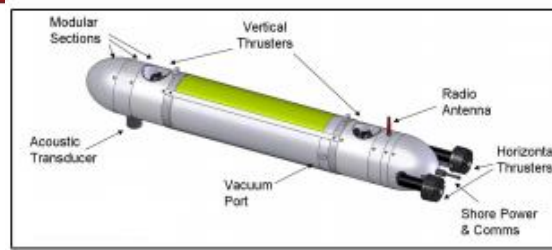


Figura 1.1: AUV "MARES".
 Fuente: [8]

Otro modelo AUV es el "REMUS 600-S" [Figura 1.2] del Kongsberg Maritime. Este vehículo está diseñado para navegar entre 600 y 1500 m de profundidad a 2.1 m/s, para realizar estudios oceanográficos de alta resolución y mediciones batimétricas IHO. Posee un propulsor y tres timones posteriores, con capacidad de navegación precisa utilizando información de aceleraciones y giros del INU y un sistema de GPS. [9]



Figura 1.2: "REMUS 600-S".
 Fuente: [9]

Entre los AUV de tipo no torpedo, se puede encontrar el "Starbug" [Figura 1.3] del CSIRO Robotic Team de 1.2 m y 26 kg. Este vehículo está diseñado para navegar a 300 mm del fondo marino, aproximadamente a 100 m, a una velocidad de 0.7m/s, para realizar monitoreo ambiental de flora y fauna por medio de video y supervisión de la calidad del agua de la Gran Barrera de Coral. Para ello, posee dos cámaras CMOS con iluminación LED, IMU especializado por CIRSO, compás magnético, sensor de presión y GPS. [10].



Figura 1.3: "STARBUG".
 Fuente: [10]

Por último, otro modelo es el “Puma and Jaguar” [Figura 1.4] del “Woods Hole Oceanographic Institution” de 2 m x 1.5 m y 250 kg. Este vehículo está diseñado para navegar en el bajo la capa Ártica, 5000 m, a 35 cm/s, para realizar mapeo fotográfico y estudios batimétricos. Para ello, este vehículo está formado por 2 cuerpos, uno encima de otro, unido por una armadura de aluminio, junto con dos propulsores traseros. Cabe resaltar que este vehículo cuenta con un par de sensores de retrodispersión para medir las partículas suspendidas en el agua, una cámara con luz estroboscópica, sonar de imagen y un magnetómetro para el estudio topológico del fondo ártico, además, de un giroscopios de 3 ejes de fibra óptica, sensor de presión y sensor de profundidad para la navegación y sensores de temperatura, conductividad y salinidad del agua [11].



Figura 1.4: “Puma and Jaguar”.
Fuente: [11]

Entre los métodos de control de este tipo de vehículos, AUV, se pueden encontrar simples controles PID de trackeo [12], como técnicas más avanzadas de control, como Lógica difusa (*Fuzzy Logic*) [13], Control adaptativo [14] y Control neuro-difuso [15]. El control PID es un control lineal, que se deriva de las técnicas de control computarizada sobre el torque en robótica. El control difuso puede prescindir de un modelo matemático completo y abordar sistemas no lineales teniendo, por tanto la capacidad de inferir acciones de acuerdo a un conjunto de reglas preestablecidas. El control adaptativo, que a pesar de necesitar un modelo matemático preciso del sistema, es de complejidad mediana en cuanto a su aplicación computacional. Y, finalmente, el control neuro-difuso el cual combina la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales con la capacidad de inferencia del sistema difuso, siendo por ello, un modelo completo aunque con gran coste computacional.

En la Tabla 1.1, se resumen las principales características de los AUV's presentados anteriormente.

Tabla 1.1: Cuadro resumen de características de AUVs.
Fuente: Elaboración propia.

	Propietario	Forma	Uso	Dimensiones (m)	Peso (Kg)	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)	Dispositivos
MARES	Universidad de Porto	Torpedo	Estudio ambiental de la zona costera.	1.5 x 0.2	32	100	2.0	<ul style="list-style-type: none"> • Transductor acústico omnidireccional. • Compás digital. • Sensor de presión.
REMUS 600-S	Kongsberg Maritime	Torpedo	Mediciones batimétricas	3.25 x 0.32	240	600-1500	2.1	<ul style="list-style-type: none"> • ADCP • Sonar lateral • INS • Sensor de presión. • Sensor de profundidad. • GPS
STARBUG	CSIRO Robotic Team	Torpedo/Box	Monitoreo ambiental de la Gran Barrera de Coral	1.2 x 0.45 x 0.15	26	100	0.7	<ul style="list-style-type: none"> • Estéreo CMOS Camera. • IMU. • Compás magnético. • Sensor de presión. • GPS.
PUMA AND JAGUAR	Woods Hole Oceanographic Institution	Caraca de espacio abierto	Estudio del fondo marino Ártico	2 x 1.5	250	5000	0.35	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara digital con iluminación estroboscópica. • Imagen de sonar. • Giroscopio de Fibra óptica. • Magnetómetro. • Sensor de presión. • Sensor de temperatura.

1.3. *Objetivos*

El objetivo principal del presente trabajo es el desarrollo de un sistema de estabilización para un AUV utilizando control PID.

Objetivos Específicos:

- Seleccionar un modelo matemático para simular, por medio de control PID, la estabilización del sistema
- Seleccionar sensores de precisión necesarias para el correcto funcionamiento.
- Seleccionar actuadores con alta resolución y control estable para realizar las correcciones necesarias.

1.4. *Requerimientos del sistema*

Requerimientos Mecánicos

- Modelo matemático del funcionamiento de las aletas y las características hidrodinámicas relacionadas con el AUV.
- Disposición del hardware apropiado para evitar mal funcionamiento debido a vibraciones, comprobándolo por métodos computacionales.

Requerimientos Electrónicos

- El sistema debe contar con actuadores apropiados para la respuesta rápida y precisa.
- Los elementos utilizados deben tener un valor económico accesible al mercado local.

Requerimientos de Control

- El sistema a desarrollar debe tener un solo controlador donde se procese las órdenes provenientes del controlador principal existente y ejecute las correcciones a las aletas del AUV.
- El controlador debe ser de rápida respuesta para que pueda ejecutar las correcciones en tiempo real.

1.5. Metodología y Plan de trabajo

En primer lugar, se buscará información científica para orientar el modelamiento del sistema de propulsión y estabilización para el correcto desarrollo del sistema de estabilización. Se realizará luego una revisión exhaustiva de material bibliográfico sobre tipos de AUVs y las partes involucradas para la estabilización tales como controladores, aletas, actuadores y sensores que sean apropiados de acuerdo a los objetivos y requerimientos del proyecto.

En segundo lugar, se seleccionará el AUV para hacerle el estudio y modelamiento matemático para obtener los parámetros necesarios para el diseño de control; se seleccionará y detallará los componentes electrónicos adecuados que respondan positivamente ante los requerimientos del proyecto, esto incluye, sensores, actuadores, controladores y un sistema de control de respuesta. En esta etapa, se entregará la documentación necesaria, como planos mecánicos y diagrama de flujos.

En tercer lugar, se realizarán las simulaciones por software que permitan validar el sistema de control propuesto, teniendo en consideración los requisitos del sistema.

Finalmente, se presentarán las conclusiones obtenidas luego de los resultados, así como sugerencias en cuanto al diseño y sistema de control.

Esta información se encuentra detallada en la Figura 1.5: Calendario de trabajo.

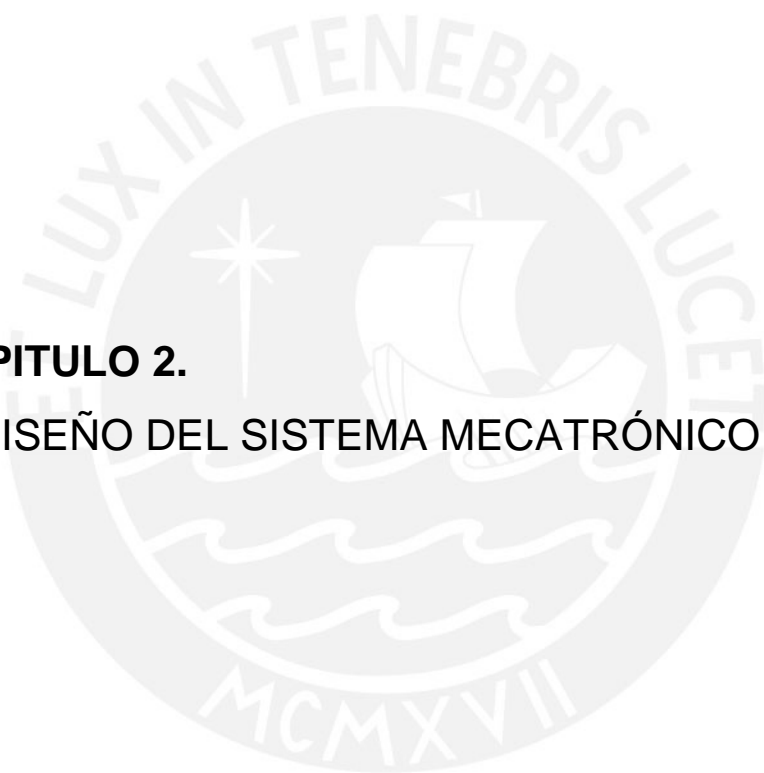
Plan de trabajo

Actividades	Inicio	Fin	Duración(días)	22 de marzo	29 de marzo	5 de abril	12 de abril	19 de abril	26 de abril	3 de mayo	10 de mayo	17 de mayo	24 de mayo	31 de mayo	7 de junio	14 de junio	21 de junio	28 de junio	5 de julio	12 de julio
				16 de marzo	23 de marzo	30 de marzo	6 de marzo	13 de abril	20 de abril	27 de abril	4 de mayo	11 de mayo	18 de mayo	25 de mayo	1 de junio	8 de junio	15 de junio	22 de junio	29 de junio	6 de julio
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Selección de tema y realización de cronograma	16 de marzo	22 de marzo	7	x																
1 Revisión de literatura				Investigación																
1.1 Presentación de la problemática	16 de marzo	29 de marzo	14	x	x															
1.2 Antecedentes o estado de la tecnología	23 de marzo	29 de marzo	7		x	x														
1.3 Objetivos	23 de marzo	29 de marzo	7			x														
1.4 Delimitación del Proyecto	23 de marzo	5 de abril	14			x	x													
2 Diseño del Sistema mecatrónico				MDM																
2.1 Estructura de funciones	30 de marzo	5 de abril	14		x	x														
2.2 Matriz morfológica	30 de marzo	5 de abril	7			x														
2.3 Concepto solución	30 de marzo	5 de abril	14			x	x													
3 Sistema Mecánico				Diseño Mecánico																
3.1 Cálculos preliminares	30 de marzo	12 de abril	21			x	x	x												
3.2 Selección de mecanismos	6 de marzo	26 de abril	28				x	x	x	x										
3.3 Desarrollo de planos	13 de abril	26 de abril	14						x	x										
4 Sistema Electrónico				Diseño electrónico																
4.1 Selección de componentes electrónicos	27 de abril	10 de mayo	28					x	x	x	x									
4.2 Desarrollo de planos electrónicos	4 de mayo	10 de mayo	14								x	x								
5 Sistema de Control				Diseño de Control																
5.1 Selección de estrategia de control	11 de mayo	24 de mayo	14								x	x								
5.2 Desarrollo por diagramas	18 de mayo	7 de junio	28									x	x	x	x					
5.3 Simulaciones	25 de mayo	7 de junio	21										x	x	x					
6 Conclusión y recomendaciones				Conclusión																
6.1 Analisis de información	8 de junio	14 de junio	14												x	x				
6.2 Presentación de resultados	15 de junio	21 de junio	7														x			
7 Presentación de documento de tesis				DOCUMENTACION																
7.1 Documentación de la tesis	16 de marzo	21 de junio	98	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
7.2 Preparación del documento final	15 de junio	5 de julio	21														x	x	x	
7.3 Entrega de tesis	6 de julio	12 de julio	7																	x

Figura 1.5: Calendario de trabajo.
Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 2.

DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO



En este capítulo se desarrollará la metodología del diseño mecatrónico, según la norma VDI 2225 empezando por la estructura de funciones, que explica los procesos involucrados en el AUV. Luego, se realizará la matriz morfológica que mostrará los elementos disponibles para realizar el diseño. Se presentarán tres opciones de solución provenientes de las alternativas mostradas, para ser sometidas a una evaluación técnica-económica.

Luego de obtener el concepto solución, se describirá el arreglo mecánico para el soporte de tarjetas indicando las consideraciones presentes por la vibración del sistema; el diagrama de componentes del AUV que explica las relación entre estos para el funcionamiento del sistema. Finalmente, se plantearán los diagramas de flujo que describen el funcionamiento del sistema; y se definirá el modelo matemático junto con las variables y las ecuaciones que se utilizaran.

2.1. Estructura de Funciones

Primero se realiza una abstracción del sistema por medio del método de la caja negra (black-box), Figura 2.1, para tener en cuenta cuales deberían ser las entradas y salidas del sistema. Dentro de esta “caja negra” ocurren procesos, descritos más adelante, que transforman las entradas en las salidas.

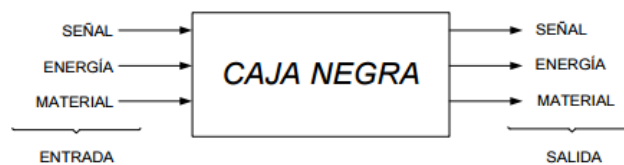


Figura 2.1: Estructura de funciones- caja negra.
Fuente: Norma VDI 2225

Caja negra: Módulo de estabilización y control del AUV.

Entrada:

Señal: Rumbo establecido, profundidad deseada (datos en binario).
 Energía: Energía eléctrica para alimentación de control y potencia ($\pm 12\text{VDC}$).
 Material: Ninguno.

Salida:

Señal: Ninguna.
 Energía: Energía cinética de los timones, vibración, calor.
 Material: Ninguno.

Procesos técnicos

Se muestra en la Figura 2.2: Diagrama de Funciones., los procesos involucrados en el AUV, que son los procesos dentro de la “caja negra”. Este cuenta con un sistema de navegación, el cual no será descrito a profundidad en el presente trabajo. Sin embargo, se recibirá de este el rumbo (ángulo de cabeceo y ángulo de giro) y la profundidad deseada para el AUV. Esta información proviene por medio de comunicación serial en tramas de bits, en una codificación binaria especial. Por ello, el módulo de estabilización propuesto se encarga de decodificar primero esta información, convertirlos en parámetros (ángulos) que puedan ser manejados por el controlador y convertirlos en movimientos de los timones para que el AUV realice, en suma, la trayectoria deseada.

Además, se adquieren de los sensores internos el rumbo y la profundidad a la cual se encuentra el AUV y se acondicionan estas señales para ser comparadas con las provenientes del sistema de navegación. Las correcciones, tanto de rumbo como de profundidad, son necesarias para analizarlas en conjunto con la posición de los motores, además de considerar la estabilización de rolido a la estabilización general

Estas acciones son verificadas y, de ser necesarias, limitadas debido al impedimento físico de los timones (-45° a 45°).

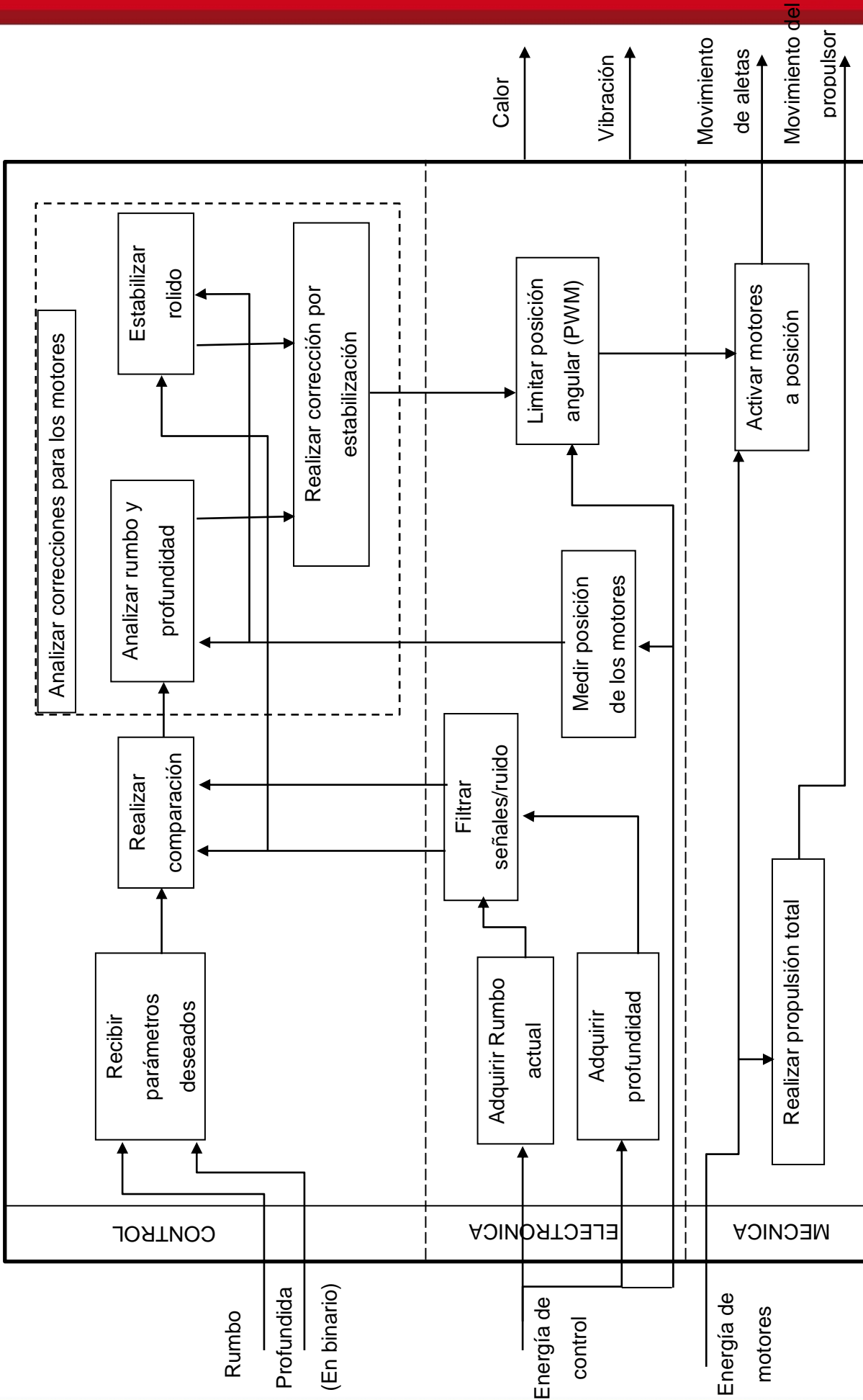




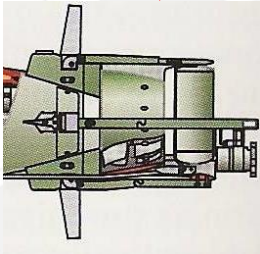

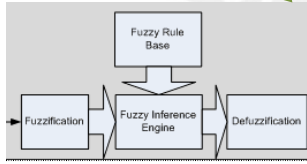
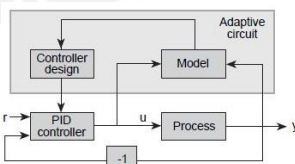
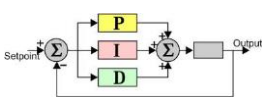









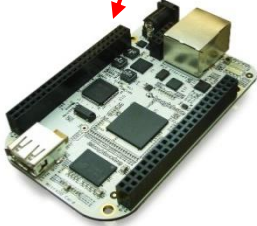


Figura 2.2: Diagrama de Funciones.
Fuente: Elaboración propia.

2.2. Matriz Morfológica

Según la norma VDI 2225 se debe realizar una matriz morfológica, mostrada en la Tabla 2.1, la cual permitirá discernir sobre los componentes a utilizar. Si bien no se realizará la fabricación general, sino la modificación del sistema de control, se trata de un análisis de las diferentes AUVs y como sus elementos afectan al control de estabilización.

Tabla 2.1: Matriz morfológica.
Fuente: Elaboración Propia

<p>Nariz del AUV</p>	 <p>Media esfera</p>	 <p>Cónica</p>	 <p>Plana</p>
<p>Propulsión y manejo</p>	 <p>Hélice simple y aletas en cruz de quilla</p>	 <p>Hélice contra rotativa en tobera y aletas en cruz de quilla</p>	 <p>Propulsor azimutal y propulsores laterales</p>
<p>Algoritmo de Control</p>	 <p>Fuzzy Logic</p>	 <p>Control Adaptativo</p>	 <p>Control PID</p>
<p>Motor de propulsión</p>	 <p>Motor DC</p>	 <p>Motor DC brushless</p>	<p>-</p>

<p>Motor de control</p>	 <p>Servomotor</p>	 <p>Motor DC + encoder</p>	 <p>Motor DC brushless + encoder</p>
<p>Acople de control</p>	 <p>Sistema planetario</p>	<p>-</p>	 <p>Z-drive</p>
<p>Tarjeta controlador</p>	 <p>Beaglebone</p>	 <p>Arduino mega</p>	 <p>Raspberry PI</p>
	<p>Solución 1</p>	<p>Solución 2</p>	<p>Solución 3</p>

2.3. Conceptos de solución

Debido a que el AUV a escoger debe ir a grandes velocidades marinas, 25-35 nudos (46.3 – 64.82 km/h), los siguientes tres diseños están basados en el modelo tipo torpedo. Estos se caracterizan por ser de sección circular y nariz convexa debido a la hidrodinámica involucrada a estas velocidades.

Primer Concepto Solución

Este primer diseño es el más simple de los tres, se puede observar en la Figura 2.3 que la carcasa es de sección circular con nariz esférica, lo que le proporciona una hidrodinámica aceptable. Además, cuenta con un sistema de propulsión simple, por medio de una única hélice accionada por un motor DC. De acuerdo a las funciones planteadas, este motor debe ir siempre a máxima potencia para dar la velocidad necesaria. Además, de la hélice ubicada en la parte posterior del AUV, cuenta con 4 aletas dispuestas en cruz (cruz de quilla), son dos aletas verticales independientes para el control de rolido y dirección y dos aletas horizontales conectadas por un mecanismo interno para el control de profundidad, además de influir en el cabeceo del móvil. Estas aletas serán accionadas por motores DC con encoder acopladas a un sistema de engranajes planetarios para su transmisión, teniendo en cuenta las fuerzas hidrodinámicas involucradas para el cambio de rumbo.

Para el control de estabilización se utilizará un control PID para mantener el ángulo indicado por el sistema de generación de trayectoria debido a la simplicidad de sus mecanismos. Este sistema se implementará en una tarjeta Arduino Mega ya que es la más potente entre otras tarjetas Arduino. [Ver ANEXO 3]

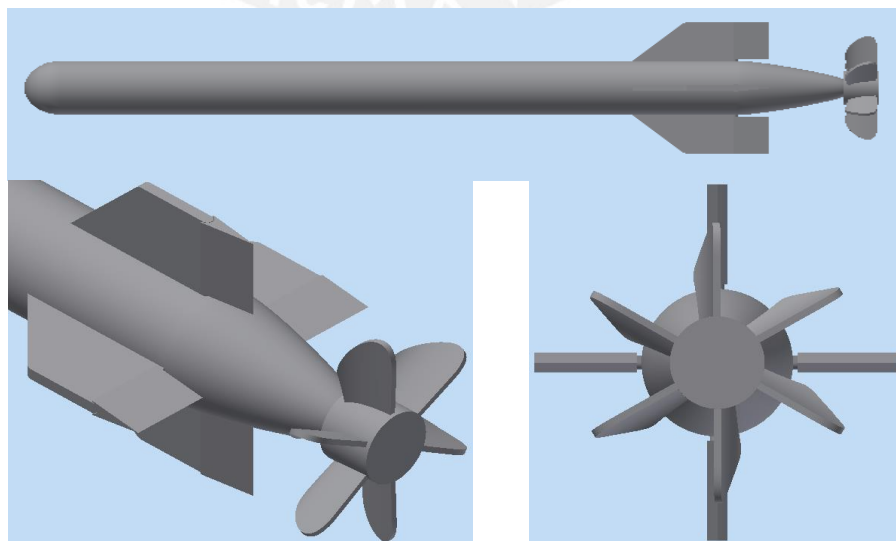


Figura 2.3: Vistas del Primer concepto solución.
Fuente: Elaboración Propia

Segundo Concepto Solución

Para este diseño, mostrado en la Figura 2.4, se pensó en una nariz cónica y se mantiene la carcasa de sección circular. En este caso, la hidrodinámica se ve mejorada por la nariz ya que opone menos resistencia a las corrientes generadas alrededor del casco por la velocidad. Para este sistema de propulsión se escogió un sistema de doble hélice, contra rotatorias encapsuladas en una tobera. Este sistema de hélices contra rotatorias con tobera genera una mayor propulsión y disminuye considerablemente el ruido natural de este tipo de vehículos debido al giro de las hélices. En este caso se utilizará un motor DC brushless para accionar el sistema de propulsión. Se mantienen las cuatro aletas en la cruz de quilla, pero accionadas con motores DC brushless en conjunto con encoders estabilizar al móvil generando las correcciones necesarias. De igual manera, será acoplado con engranajes dispuestos en sistemas planetarios.

En este caso, se utilizará un control adaptativo implementado en una Beaglebone [Ver ANEXO 3] para aprovechar la capacidad de autorregularse de este tipo de control frente a las perturbaciones por la marea y vibraciones, así como también la velocidad de procesamiento de la tarjeta, que ayuda a la rápida respuesta de reacción para la corrección de rumbo.

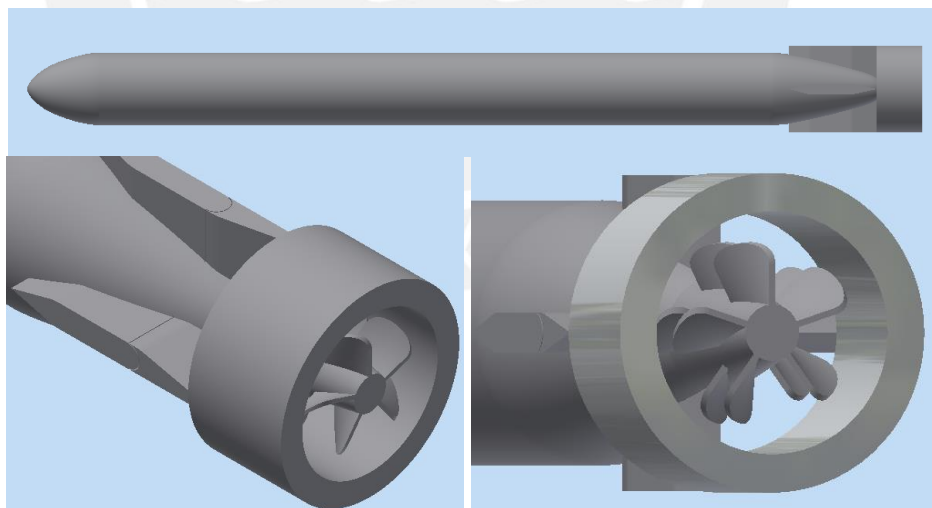


Figura 2.4: Vistas del Segundo concepto solución.
Fuente: Elaboración propia

Tercer Concepto Solución

En este diseño, se pensó en una nariz plana con carcasa de sección circular. Para el sistema de propulsión, se utilizara dos propulsores azimutales en la parte posterior, tal y como se muestra en la Figura 2.5. Con este sistema, se puede prescindir del uso de aletas, ya que estos propulsores tienen la capacidad de girar y así modificar el rumbo del AUV. Estos propulsores cuentan con toberas, tal como en el concepto anterior, se aprovecha mejor la potencia de los motores generando más fuerza de empuje. Este contará con dos motores por propulsor, un motor interno dentro del propulsor azimutal, y un servomotor acoplado en Z-drive para girar estos propulsores. Además, para controlar la profundidad, se utilizará dos propulsores laterales (hélices con toberas) que puede cambiar de sentido de giro. Estos serán accionados con motores DC.

Debido a la complejidad del control por la cantidad de motores y su distribución, se utilizará Lógica difusa implementado en un Raspberry PI. [Ver ANEXO 3]

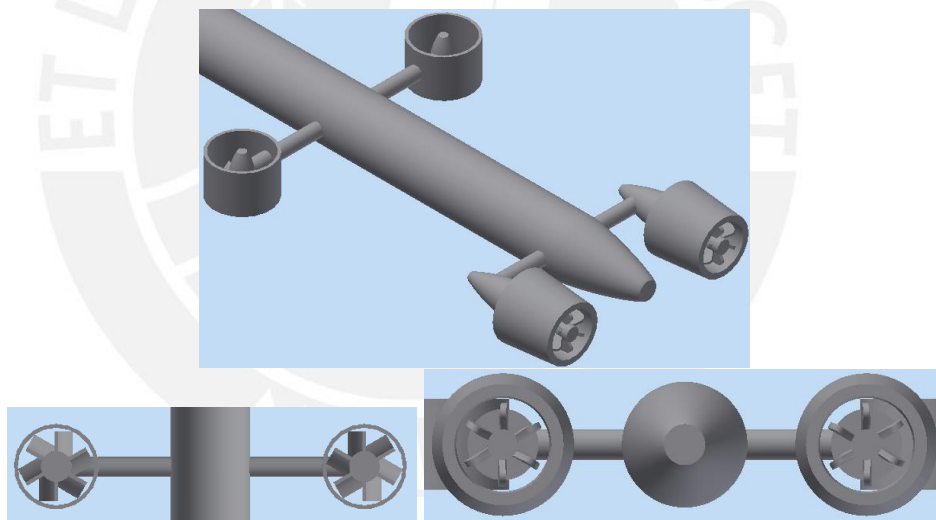


Figura 2.5: Vistas del Tercer concepto solución.
Fuente: Elaboración propia

2.4. Evaluación de soluciones

El siguiente estudio se realizó según Norma VDI 2225. En este análisis, se proponen criterios de evaluación técnicos, Tabla 2.2, para poder evaluar las características de los tres diseños de solución propuestos. Como se puede observar, para este trabajo se analizan los efectos en el control y desempeño del AUV.

Tabla 2.2: Evaluación criterios técnicos.
Fuente: Elaboración propia.

EVALUACIÓN DE PROYECTOS								
Valor Técnico (Xi)								
p : puntaje de 0 a 4 (Norma VDI 2225)								
0 = No Satisface, 1 = Poco Aceptable, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Ideal								
g = peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación								
Variantes de Concepto			Solución 1		Solución 2		Solución 3	
Nro.	g	Criterio de Evaluación	p	gp	p	gp	p	gp
1	4	Controlabilidad	3	12	3	12	2	8
2	4	Facilidad de implementación de control	4	16	3	12	2	8
3	4	Facilidad de modelamiento matemático	3	12	3	12	2	8
4	3	Estabilidad	3	9	4	12	4	12
5	3	Hidrodinámica	4	12	4	12	2	6
6	3	Rango de movimiento	3	9	3	9	4	12
7	3	Independencia de variables de control	2	6	2	6	4	12
8	3	Fabricación	3	9	3	9	2	6
9	2	Conservación de la energía	2	4	4	8	2	4
10	2	Velocidad	3	6	4	8	2	4
4* \sum g	124	Puntaje \sum p o \sum gp	30	95	33	100	26	80
		Valor Técnico Xi		0.77		0.81		0.65

En la Tabla 2.3 se muestran los criterios económicos que sirven para analizar otro punto de vista de cada solución propuesta, no solo considerando la parte técnica.

Tabla 2.3: Evaluación criterios económicos.
Fuente: Elaboración propia.

EVALUACIÓN DE PROYECTOS								
Valor Económica(Xi)								
p : puntaje de 0 a 4 (Norma VDI 2225)								
0 = No Satisface, 1 = Poco Aceptable, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Ideal								
g = peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación								
Variantes de Concepto			Solución 1		Solución 2		Solución 3	
Nro.	g	Criterio de Evaluación	p	gp	p	gp	p	gp
1	4	Cantidad de piezas mecánicas	3	12	4	16	2	8
2	4	Costo de tecnología	3	12	3	12	2	8
3	3	Disponibilidad en el mercado	2	6	3	9	3	9
4	3	Simplicidad del ensamblaje	3	9	4	12	3	9
5	3	Costo de energía	3	9	4	12	2	6
6	3	Mantenimiento	3	9	3	9	4	12
4* $\sum g$	80	Puntaje $\sum p$ o $\sum gp$	17	57	21	70	16	52
		Valor Económica Yi		0.71		0.86		0.65

En la Tabla 2.4: Consolidado de las soluciones planteadas y normalizadas., se resumen los resultados de las tres soluciones con respecto a cada evaluación, técnica (Xi) y económica (Yi).

Tabla 2.4: Consolidado de las soluciones planteadas y normalizadas.
Fuente: Elaboración propia.

	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Xi	0.77	0.81	0.65
Yi	0.71	0.86	0.65

La comparación de las soluciones se hace en la Figura 2.6, en esta se compara con la línea media que es el ideal, puesto que está equilibrada tanto en el aspecto técnico como económico. La mejor solución sería la más cercana a esta línea y más cerca del extremo superior derecho. Finalmente se escoge la solución 2 como la solución óptima ya que es la más cercana a la línea media y además, a comparación de las otras, se encuentra cerca del extremo superior derecho, esto evidencia que tiene las características más cercanas a las ideales.

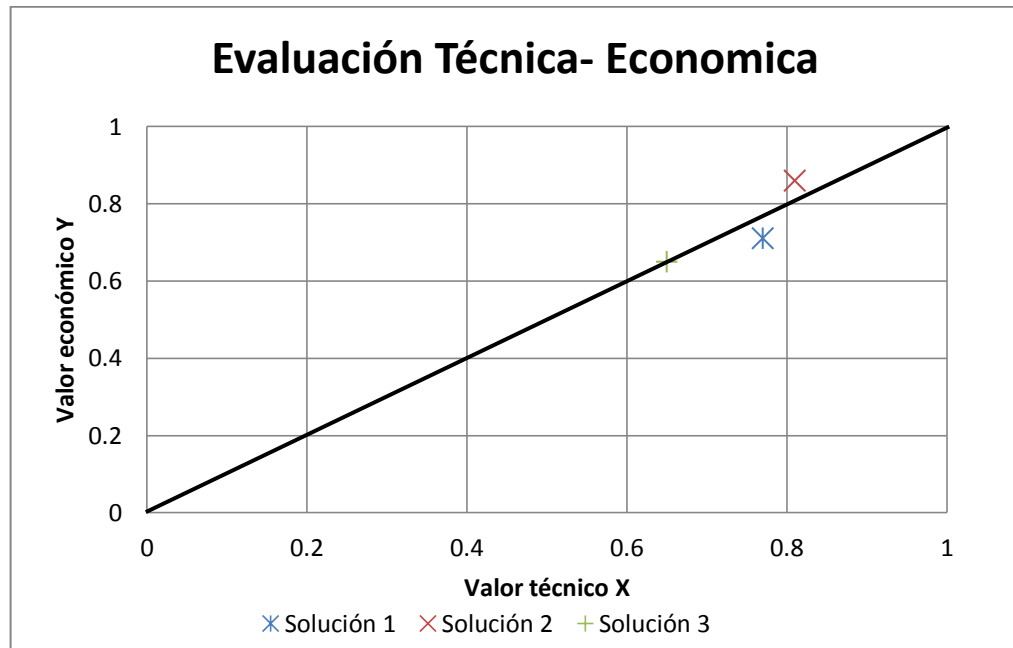


Figura 2.6: Gráfica del consolidado de la Evaluación técnico-económica.
Fuente: Elaboración propia.

2.5. Presentación del concepto óptimo

El diseño de AUV escogido está basado en el modelo de torpedo Mk44 (1970). [16] Este torpedo, mostrado en la Figura 2.7, consta de 4 etapas: sonar, cabeza explosiva, sistema de control y baterías y los motores de propulsión y aletas. Es de sección circular de 32 cm de diámetro, 2.5 m de longitud y pesa 196 kg con un alcance efectivo de 123 metros a una profundidad máxima de 910 metros. Es considerado torpedo ligero de cabeza acústica activa, utilizado contra submarinos con velocidad menor a 17 nudos (31.48 km/h) y puede ser lanzado desde helicópteros, aviones o buques. Cuenta con un motor eléctrico de 30 HP lo que le permite desplazarse a 30 nudos (56 km/h) y su batería le permite un recorrido de 5.5 km, equivalentes a 6 minutos de operación, esto incluye el recorrido de acercamiento y búsqueda.



Figura 2.7: Torpedo Mk44.
Fuente: [16]

Debido a la modernización de los sistemas y las capacidades de respuesta y procesamiento se prefieren actualmente sistemas digitales que analógicos, es por ello que se decide actualizar el sistema de este tipo de torpedos con un controlador digital. Es por ello que se considera un sistema de control con microcontrolador capaz de estabilizar el móvil utilizando los parámetros matemáticos de simulaciones y comprobar así un algoritmo de control.

Es por esto que se considera utilizar un Beaglebone Black, ya que sus especificaciones técnicas [Ver ANEXO 3] son las más apropiadas para realizar operaciones matriciales, operación con punto flotante, teniendo en cuenta la alta velocidad del torpedo, así como las influencias de las fuerzas hidrodinámicas involucradas en el sistema.

En el presente trabajo no se abordará la generación de trayectoria proveniente del sistema de guía (sonar), solo se simularán las condiciones mencionadas y se verificará que el algoritmo brinde un control aceptable, en un principio, para estabilizar el móvil. Es decir, lograr que el AUV corrija su rumbo con respecto al setpoint propuesto.

Para la elaboración del modelo de control es necesario recurrir a métodos experimentales para obtener los parámetros necesarios que describan el comportamiento del AUV frente a las fuerzas hidrodinámicas. Ante la imposibilidad de recurrir a este método y, considerando que es necesario demostrar la posibilidad

de estabilizar al AUV frente a las perturbaciones y las condiciones del sistema, se llevará a cabo la simulación del algoritmo de control a un modelo de AUV donde se hayan realizado estos experimentos. Por ello, se utilizarán los parámetros del modelo *REMUS*, utilizados por Timothy Presterio del “*Massachusetts Institute of Technology*” [17]. Este modelo, Figura 2.8: AUV REMUS 600 - S., es de distribución similar al que se escogió en un principio, sin embargo, es de menor peso, tamaño y velocidad. Se escogió este modelo particular entre otros AUV's debido a la semejanza que presenta con el modelo deseado, con lo cual es factible obtener respuestas que puedan satisfacer más adelante al modelo real.



Figura 2.8: AUV REMUS 600 - S.
Fuente: [9]

2.6. Elemento de soporte de Hardware

El diseño contemplado para contener los componentes analógicos consta de 4 platos de Aluminio ASTM D 3003, unidos por 4 barras de acero A36 de sección circular roscado en los extremos, y separados por 20 separadores de acero A36. En la Figura 2.9, se muestra como están dispuestos los elementos antes mencionados. Para mas detalle de esta estructura véase el ANEXO 4.

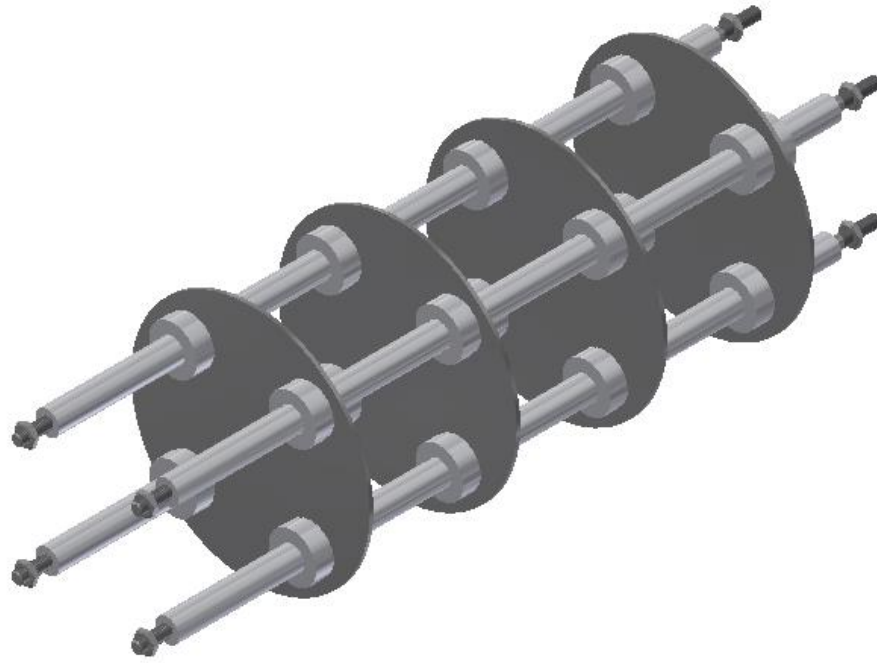


Figura 2.9: Arreglo mecánico de soporte de hardware.
Fuente: Elaboración propia

En el MK44, encima de estos platos se encuentra todos los dispositivos electrónicos, tal como se observa en la Figura 2.10.



Figura 2.10: Disposición real de componentes analógicos.
Fuente: [17].

Debido a que este móvil se encuentra a altas velocidades, y a la variación en los ángulos Eulerianos, hace que esta estructura esté sujeta a vibraciones. Es complicado saber exactamente con qué frecuencia oscila, es por ello que existen estándares militares [18] donde norman los métodos para probar los dispositivos presentes en su equipos. En el caso de torpedos, tienen rangos de vibración entre 10 a 2000 Hz y la norma indica que la amplitud máxima que soporten los componentes eléctricos sea de $1.5\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$. Es por ello, que se dispondrá el arreglo mecánico a un análisis de frecuencia modal y observar en que frecuencias este entra en resonancia, y dado que en estos puntos se genera la máxima deformación, para corroborar que no supere el desplazamiento indicado por la norma MIL-STD-202G.

2.7. Diagrama de componentes eléctricos

El AUV está dividido en cuatro etapas para desplazarse autónomamente, tal y como se muestra en la

Figura 2.11: Diagrama de componentes del AUV. La primera consta del sonar, el cual se encarga detectar el objetivo y darle seguimiento. La segunda etapa es de sensado, aquí se encuentran los sensores de giro y profundidad. Estos se encargan de medir tanto los ángulos del móvil ladeo (yaw), cabeceo (pitch) y rolado (roll) como la profundidad a la cual se encuentra. Esta información se utiliza como realimentación del sistema de control para corregir la dirección del móvil. La tercera etapa es la de control, conformada por un módulo de generación de trayectoria, un módulo central de control (CPU) y un módulo de control de motores, además están ubicadas las baterías. En esta etapa, el módulo de la generación de trayectoria utiliza la información del sonar para generar los puntos necesarios para interpolar la trayectoria y así tener un control más preciso del móvil. La CPU recibe los datos provenientes del giroscopio, el sensor de presión y la trayectoria designada por el modulo anterior y la retroalimentación de los encoders, para ser procesados en un algoritmo de control. El resultado de este proceso es enviado al módulo de control de motores, para generar las correcciones de rumbo necesarias en las aletas. La cuarta y última etapa es la de actuadores, aquí se encuentran los motores de las aletas acopladas a estas mediante elementos mecánicos, los encoders encargados de sensar la posición del motor y el driver del propulsor que controla un motor contrarrotatorio para las dos hélices del propulsor.

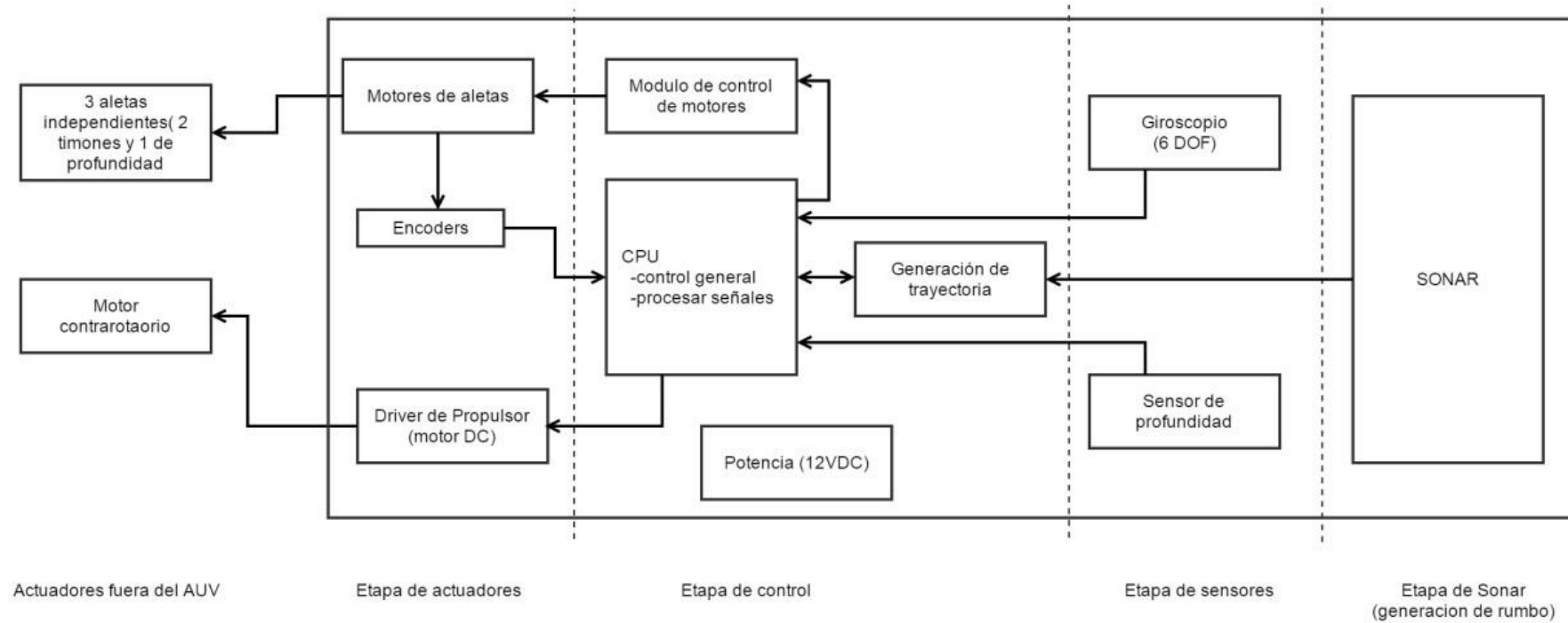


Figura 2.11: Diagrama de componentes del AUV
 Fuente: Elaboración propia

Debido a que el MK 44 es un torpedo antiguo, y analógico, existen nuevas versiones, digitales con mejores capacidades. Se pudo acceder a información protegida, de una empresa que fabrica estos elementos, y se dedujo que debido a las altas velocidades y a las no-linealidades del sistema, es complicado controlar la estabilización, y es necesaria más potencia computacional. La versión actualizada de dicho elemento, posee para el procesamiento de datos un microprocesador PowerPC 7410, utilizado en computadores MAC [19]. Además, el sensor con el que cuenta es de calidad militar, por tanto tiene características más precisas, de mayor resolución y más confiables.

Estas características del sistema, en conjunto con el impedimento de poder realizar experimentos para obtener los datos, llevan a usar otro modelo, de menores capacidades, en cuanto a la velocidad, fuerza de propulsión, peso, entre otras.



2.8. Diagrama de flujo del sistema

En la Figura 2.12: Diagrama de flujo general., se explica el funcionamiento por etapas de todo el AUV, desde el encendido hasta el enclavamiento de rumbo hacia el objetivo. Después de activado, se le configura el vector inicial por envío serial (dirección en el plano XY y profundidad del objetivo) y se activa el propulsor, lo cual inicia el movimiento del AUV.

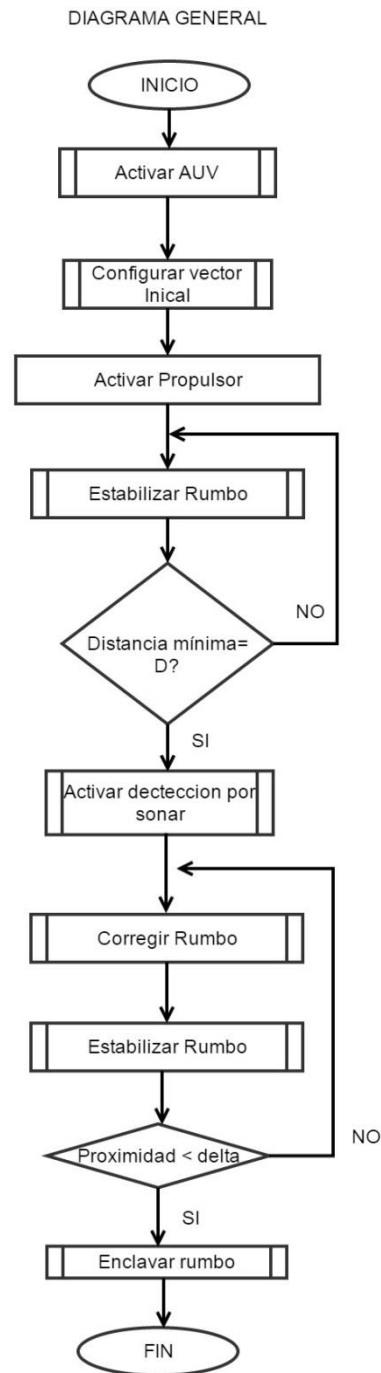


Figura 2.12: Diagrama de flujo general.
 Fuente: Elaboración propia

Este avanzará una distancia determinada con respecto al vector inicial y hasta alcanzar esa distancia estabiliza la dirección del AUV para que mantenga la trayectoria deseada. Cuando se ha alcanzado la distancia de acercamiento, se activa la detección por sonar, el cual genera una nueva trayectoria y cambia constantemente los parámetros de ángulo y profundidad, simultáneamente se realiza la estabilización de rumbo, la rutina antes mencionada. Cuando se acerca la distancia de proximidad, establecida por software, se enclavan las aletas para que siga una trayectoria de colisión.

En la Figura 2.13, se describen los procesos iniciales del AUV. Una vez encendido debe calibrarse automáticamente el giroscopio y el sensor de profundidad y encender el sonar para su próximo uso. En cuanto a la configuración del vector inicial, se debe proveer la distancia estimada del objetivo, la cual será utilizada para activar el proceso de búsqueda por medio del sonar. Y se setea la profundidad y orientación del objetivo (ángulos en el plano XY). Estos valores son necesarios para la primera fase del AUV, -fase de aproximación- la cual establece una trayectoria recta con los parámetros dados, luego con los datos recolectados por el sonar, se modifica continuamente el curso del móvil- fase de búsqueda-.

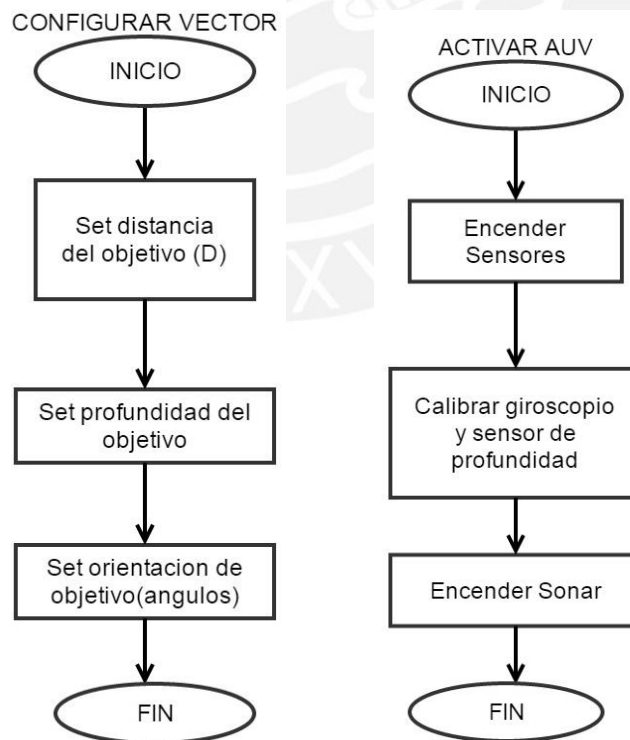


Figura 2.13: Diagramas de flujos iniciales, Activar AUV y Configurar vector
 Fuente: Elaboración propia

En el presente trabajo se centra en la estabilización del AUV, es por ello que se tratará a detalle el diagrama de flujo de la Figura 2.14: Diagrama de flujo de la estabilización de rumbo así como el modelo matemático involucrado en el algoritmo de control escogido. En ambas fases, de aproximación y búsqueda, se realiza la estabilización de rumbo, el cual recibe los parámetros deseados, ya sean dados por el usuario o por el corrector de rumbo, se comparan con la lectura de los sensores, tanto de profundidad como de giro. El resultado de este proceso es una corrección en el ángulo de las aletas, por ello es que es necesario encoders en los motores de aletas, para mantener la posición deseada. Cabe resaltar que no existe un control de velocidad de propulsión, ya que se utiliza la máxima velocidad que el motor puede entregar.

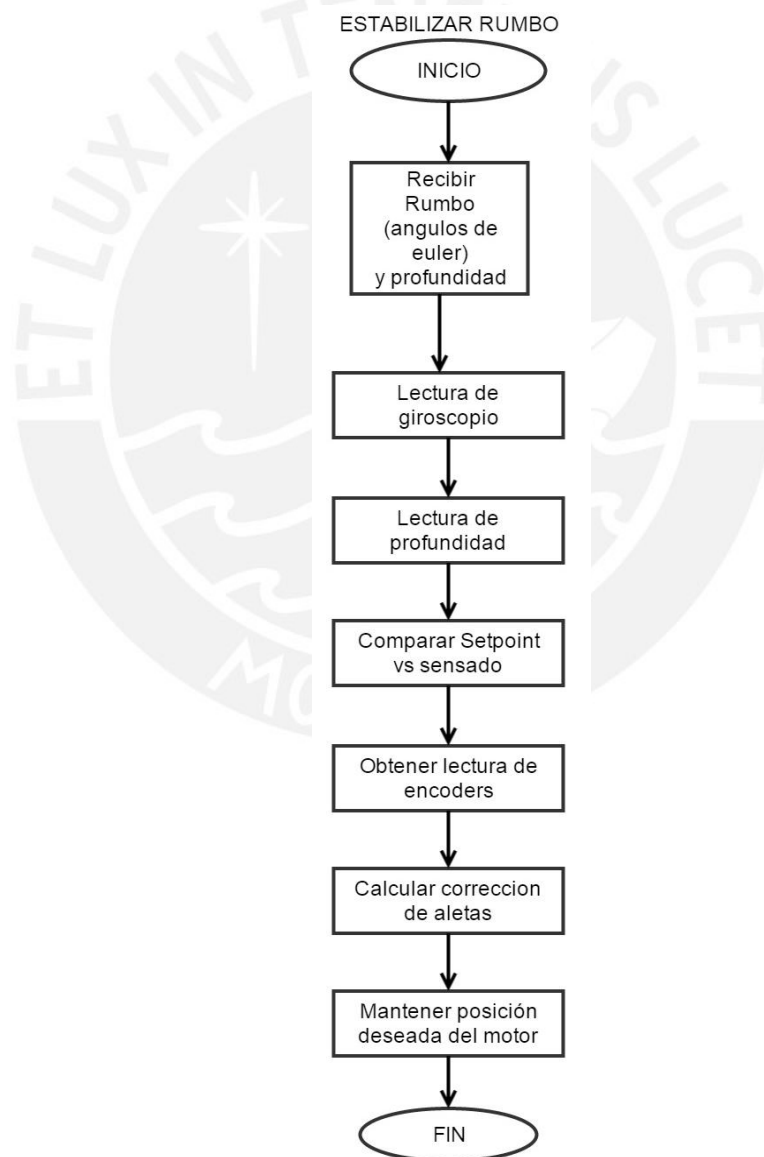


Figura 2.14: Diagrama de flujo de la estabilización de rumbo
Fuente: Elaboración propia

2.9. Modelo Matemático del sistema

La notación que se utilizará para este modelo se presenta en la Tabla 2.5, además del sistema de referencia de en la Figura 2.15.

Tabla 2.5: Notación general de vehículos marinos.
Fuente: Guidance and Control of Ocean Vehicles [20]

	DOF	Descripción	Fuerzas y momentos	Velocidades	Posiciones y ángulos de Euler
LINEALES	1	Dirección eje x	X	u	x
	2	Dirección eje y	Y	v	y
	3	Dirección eje z	Z	w	z
ANGULARES	4	Rotación eje x	K	p	ϕ
	5	Rotación eje y	M	q	θ
	6	Rotación eje z	N	r	ψ

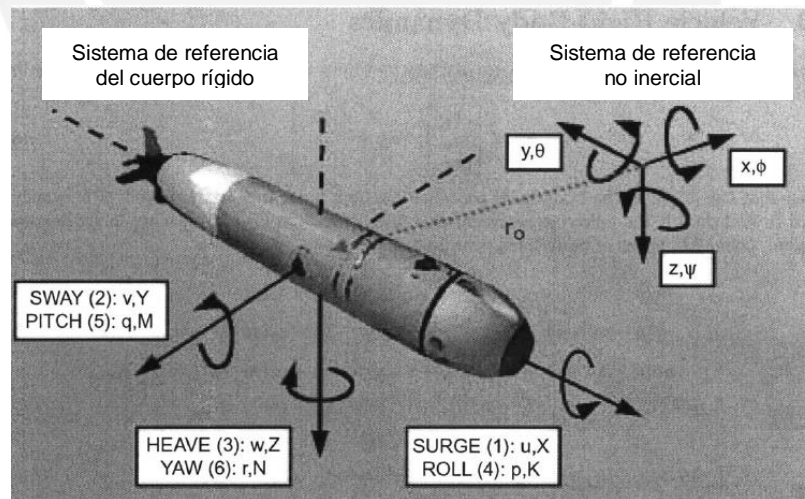


Figura 2.15: Sistema de referencia inercial y del cuerpo rígido.
Fuente: Traducido. [17]

El movimiento del vehículo puede ser descrito por los siguientes vectores (ecuaciones de la 1 a la 6) donde η describe la posición y orientación, v las velocidades de traslación y rotación, y τ las fuerzas y momentos presentes en el vehículo.

$$\eta \quad [x \quad z]^T \quad (1)$$

$$[u \quad w]^T \quad (2)$$

$$\tau \quad [X \quad Z]^T \quad (3)$$

$$[x \quad z]^T \quad (4)$$

$$[p \quad r]^T \quad (5)$$

$$\tau \quad [K \quad N]^T \quad (6)$$

Además, de las posiciones del centro de gravedad y de flotabilidad.

$$[x \quad]^T \quad (7)$$

$$[x \quad]^T \quad (8)$$

La cinemática del modelo, relación entre el sistema de referencia no inercial y el del cuerpo rígido, se muestra en las ecuaciones 9 y 10.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}) \begin{bmatrix} v \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}) \begin{bmatrix} q \end{bmatrix} \quad (10)$$

Las matrices $J_1(\eta_2)$ y $J_2(\eta_2)$, de la ecuación 9 y 10, son matrices de 3x3 que en función de los ángulos de Euler son descritos en las ecuaciones 11 y 12 respectivamente.

$$\begin{bmatrix} s & & \\ & & \\ & & \phi \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & & \\ & & \\ & & \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde $s(\cdot)$ es el seno, $c(\cdot)$ es el coseno y $t(\cdot)$ la tangente

En cuanto a la dinámica del cuerpo rígido se presentan las seis ecuaciones que gobiernan tanto el movimiento lineal, ecuación 13, como el de rotación, ecuación 14.

$$\dot{v} = \omega \times v + (\dot{\omega} \times r) + \dot{\omega} \times r \quad (13)$$

$$\dot{\omega} = \dot{\omega} \times r + \dot{\omega} \times r \quad (14)$$

En estas ecuaciones se reemplazan las notaciones descritas anteriormente (ecuaciones del 1 al 6), que da como resultado las ecuaciones 15 y 16.

$$\dot{v} = v \times v + (v \times v) \quad (15)$$

$$\dot{v} = v \times v \quad (16)$$

Debido a que son matrices de 3x3 da como resultado seis ecuaciones que describen el movimiento general del móvil, ecuaciones de la 17 a la 22. Se ha asumido, el centro del cuerpo rígido en el centro de flotabilidad, Debido a la simetría se anulan términos de inercias cruzadas dando como resultado una matriz de inercia diagonal ($I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0$). Además, se considera el término $\dot{\omega} \times r$ despreciable.

$$m[\ddot{u} \quad \dot{v} \quad \dot{w}] = \sum X \quad (17)$$

$$m[\ddot{v} \quad \dot{v} \quad \dot{w}] = \sum Y \quad (18)$$

$$m[\ddot{w} \quad \dot{v} \quad \dot{w}] = \sum Z \quad (19)$$

$$\dot{\theta} \left(I_{\theta} \right) \ddot{\theta} = \sum K \quad (20)$$

$$\dot{\varphi} \left(I_{\varphi} \right) \ddot{\varphi} = \sum M \quad (21)$$

$$\dot{\psi} \left(I_{\psi} \right) \ddot{\psi} = \sum Next \quad (22)$$

En cuanto las fuerzas y momentos externos, indicados en la ecuación 23.

$$\sum F \quad (23)$$

Las fuerzas y momentos hidrostáticas son el resultado de los efectos combinados del peso y la flotabilidad, y de las masas añadidas, correspondientes, a la influencia de tener un cuerpo en movimiento dentro de un fluido. Esto se debe entender como fuerzas y momentos inducidos por la presión del fluido circundante al móvil, las cuales son proporcionales a la aceleración de este.

Las fuerzas de sustentación son generadas por el paso del vehículo en un ángulo de ataque respecto al agua moviéndose. Generando así caídas de presión alrededor del vehículo, considerando estas como fuerzas aplicadas en el centro del área de presión.

La fuerza de arrastre es la resistencia que genera el líquido ante el avance del móvil, por lo tanto está relacionada a la velocidad y el área frontal de este, la densidad del fluido y el ángulo de ataque.

Las fuerzas de control son las relacionadas a las fuerzas y momentos que genera el propulsor y a las generadas por el ángulo de los timones.

En suma, las fuerzas y momentos externos de las ecuaciones generales son las descritas en las ecuaciones 24 a la 29.

$$\Sigma X \quad \cdot \dot{u} \quad |u|u|u| \quad (24)$$

$$\Sigma Y \quad \cdot \dot{v} \quad \cdot \dot{r} \quad |v|v|v| \quad |r|r|r| \quad (25)$$

$$\Sigma Z \quad \cdot \dot{w} \quad \cdot \dot{q} \quad |w|w|w| \quad |q|q|q| \quad (26)$$

$$\Sigma K \quad \dot{p} \quad |p|p|p| \quad (27)$$

$$\Sigma M \quad \cdot \dot{w} \quad \dot{q} \quad |w|w|w| + M \quad |q|q|q| \quad (28)$$

$$\Sigma Next \quad \cdot \dot{v} \quad \cdot \dot{r} \quad |v|v|v| \quad |r|r|r| \quad (29)$$



Entonces, ordenando las ecuaciones de la 24 a la 29 junto con las ecuaciones 17 a la 22, y dándole forma de matriz para determinar el modelo dinámico deseado, se obtiene la ecuación 30.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix} \quad (30)$$

Por tanto, reordenando y agregando las matrices cinemáticas, da como resultado doce variables de estado para realizar las simulaciones, mostradas en las ecuaciones 31 y 32.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} \sum X \\ \sum Y \\ \sum Z \\ \sum K \\ \sum M \\ \sum N \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [r] \quad (32)$$

Cabe mencionar que son necesarias las ecuaciones 11, 12, 24 a 29 y 30 para expandir el modelo matemático (ecuaciones 31 y 32).



CAPITULO 3.

PRUEBAS Y RESULTADOS



En este capítulo, se expondrán los resultados de las simulaciones realizadas. Primero, los resultados de la simulación del algoritmo de control realizado en MATLAB y luego el análisis de vibración modal al arreglo de soporte de tarjetas realizado en ANSYS.

3.1. Simulaciones de control

Del modelo presentado, ecuaciones 31 y 32, los parámetros necesarios son extraídos del trabajo de Prestero [17], en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2. Cabe resaltar, que estos parámetros pueden ser obtenidos experimentalmente con el modelo real o con simulaciones más avanzadas de dinámica de fluidos.

Tabla 3.1: Coeficientes de fuerzas del AUV REMUS- Parámetros no lineales
Fuente: Traducido de Prestero, Timothy [17]

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
\dot{u}	-1.62e+000	kg/m	Arrastre de flujo cruzado
	-9.30e-001	kg	Masa añadida
	-3.55e+001	kg/rad	Término cruzado de masa añadida
	-1.93e+000	kg*m/rad	Término cruzado de masa añadida
	+3.55e+001	kg/rad	Término cruzado de masa añadida
	-1.93e+000	kg*m/rad	Término cruzado de masa añadida
	+3.86e+000	N	Empuje de la hélice
\dot{v}	-1.31e+002	kg/m	Arrastre de flujo cruzado
	+6.32e-001	kg*m/rad ²	Arrastre de flujo cruzado
	-3.55e+001	kg	Masa añadida
	+1.93e+000	kg*m/rad	Masa añadida
	+5.22e+000	kg/rad	Término cruzado de masa añadida y sustentación de la aleta
	+3.55e+001	kg/rad	Término cruzado de masa añadida
	+1.93e+000	kg*m/rad	Término cruzado de masa añadida

	+9.64e+000	kg/(m*rad)	Fuerza de sustentación de la aleta
	-1.31e+002	kg/m	Arrastre de flujo cruzado
	-6.32e-001	kg*m/rad ²	Arrastre de flujo cruzado
	-2.86e+001	kg/m	Fuerza de sustentación del cuerpo y sustentación de la aleta
\dot{w}	-3.55e+001	kg	Masa añadida
\dot{q}	-1.93e+000	kg*m/rad	Masa añadida
	-5.22e+000	kg/rad	Término añadido masa añadida y sustentación de la aleta
	-3.55e+001	kg/rad	Término cruzado de masa añadida
	+1.93e+000	kg/rad	Término cruzado de masa añadida
	-9.64e+000	kg/(m*rad)	Fuerza de sustentación de la aleta

Tabla 3.2: Coeficientes de momentos del AUV REMUS- Parámetros no lineales
Fuente: Traducido de Prester, Timothy [17]

Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
	-1.30e-003	kg*m ² /rad ²	Resistencia al rolido
\dot{p}	-1.41e+002	kg*m ² /rad	Masa añadida
	-5.43e-001	N*m	Torque de la hélice
	+3.18e+000	kg	Arrastre de flujo cruzado
	-9.40e+000	Kg*m ² /rad ²	Arrastre de flujo cruzado
	+2.40e+001	kg	Sustentación del cuerpo y de la aleta y Momento de Munk
\dot{w}	-1.93e+000	kg*m	Masa añadida
\dot{q}	-4.88e+000	kg*m ² /rad	Masa añadida

	-2.00e+000	kg*m/rad	Término cruzado de masa añadida y sustentación de la aleta
	-1.93e+000	kg*m/rad	Término cruzado de masa añadida
	+4.86e+000	kg*m ² /rad ²	Término cruzado de masa añadida
	-6.15e+000	kg/rad	Momento de sustentación de la aleta
	-3.18e+000	kg	Arrastre de flujo cruzado
	-9.40e+000	kg*m ² /rad ²	Arrastre de flujo cruzado
	-2.40e+001	kg	Sustentación del cuerpo y de la aleta y Momento de Munk
\dot{v}	+1.93e+000	kg*m	Masa añadida
\dot{r}	-4.88e+000	kg*m ² /rad	Masa añadida
	-2.00e+000	kg*m/rad	Término cruzado de masa añadida y sustentación de la aleta
	-1.93e+000	kg*m/rad	Término cruzado de masa añadida
	-4.86e+000	kg*m ² /rad ²	Término cruzado de masa añadida
	-6.15e+000	kg/rad	Momento de sustentación de la aleta

Con los datos de estas tablas y junto a la matriz que define el sistema, ecuación 31 y 32, se procede a elaborar las simulaciones en el software MATLAB.

Dada la función $\dot{x}_n = f(x_n, u_n)$, que define la planta con x_n como las 12 variables de estado, y u_n el vector de entrada de variables: δ_r , δ_s y U_0 , que son los ángulos del timón (aleta vertical), la aleta de profundidad (aleta horizontal), respectivamente y la velocidad inicial en el eje x.

En la Figura 3.1, se muestra como se realizó por medio de la herramienta SIMULINK de MATLAB la respuesta natural de la planta modelada anteriormente. El código completo correspondiente a la planta, Modelo AUV, que implementa la matriz de variables de estado con los parámetros de las Tabla 3.1 y la

Tabla 3.2, se puede observar en el ANEXO 1.

En este caso, se desea encontrar la respuesta natural del sistema con las aletas fijadas en cero grados y velocidad lineal en el eje X fijada a 1.5 m/s. Las condiciones iniciales del sistema, velocidades lineales, a excepción de la del eje X, velocidades angulares, posiciones lineales y posiciones angulares. Debido a que se trabajan con ángulos en radianes, antes de graficarlas se hace un cambio de variable a grados sexagesimales (por ejemplo, “conv. grados1” de la Figura 3.1)

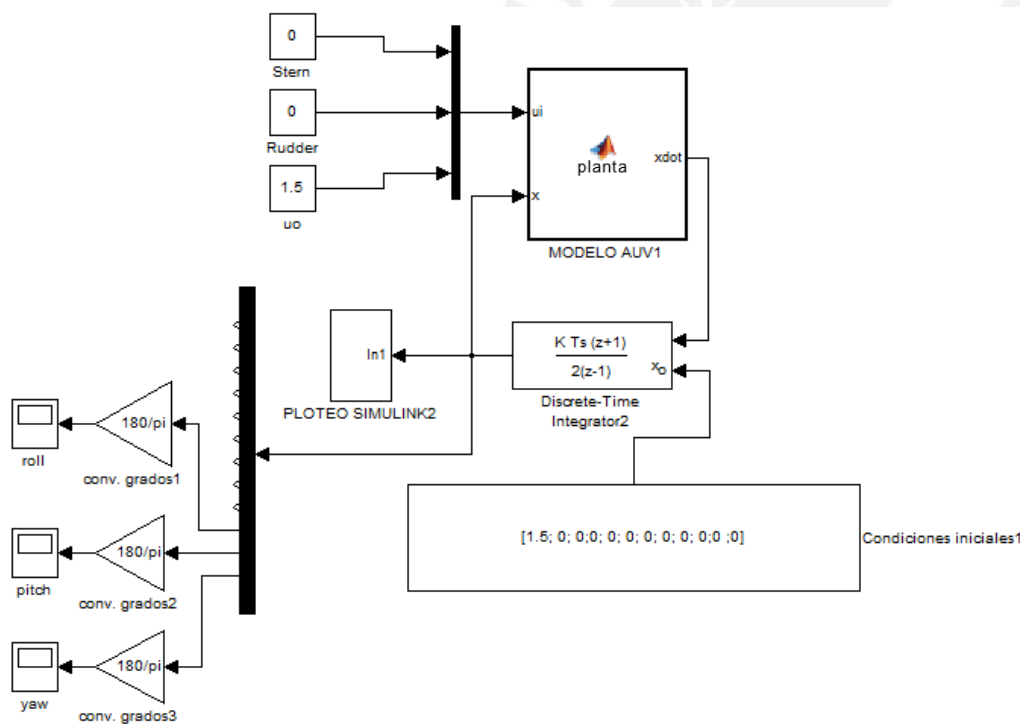


Figura 3.1: Modelo del AUV. Respuesta natural
Fuente: Elaboración propia

Se dio un tiempo de simulación de 10 s, con un periodo de muestreo de 0.01s (100Hz). Los resultados obtenidos fueron los que se muestran en la Figura 3.2 y Figura 3.3. Para poder diferenciar las señales, las de color rojo corresponden a las del eje X, verde referente al eje Y y Azul referente al eje Z. De estos resultados se puede observar el comportamiento no lineal y oscilatorio que tiene el sistema. Además, se prevé, que debido a esto, un control PID no lograría reducir significativamente las oscilaciones.

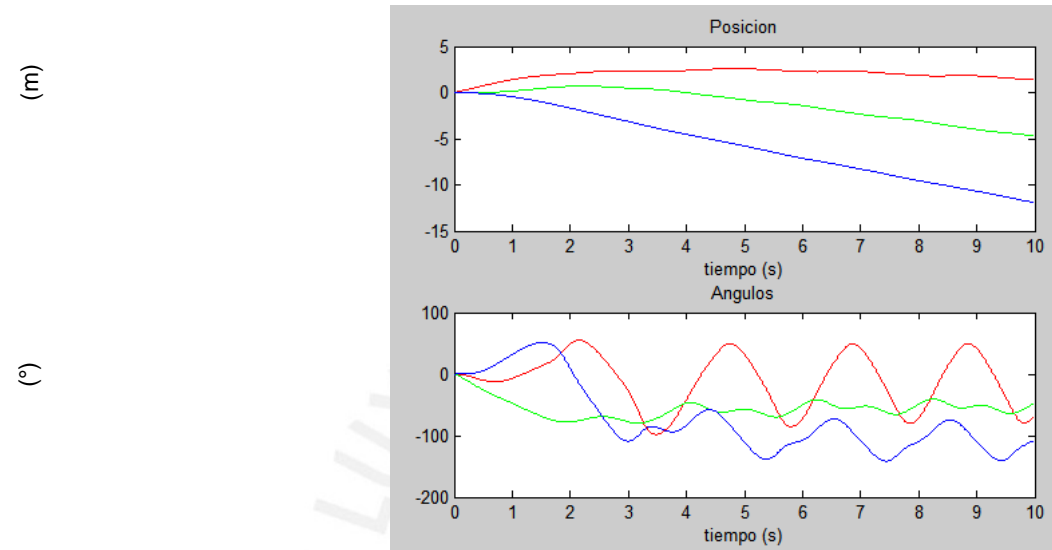


Figura 3.2: Resultados de la simulación: Posición y ángulo
 Fuente: Elaboración propia usando Matlab.

(m/s)

(m)

(°)

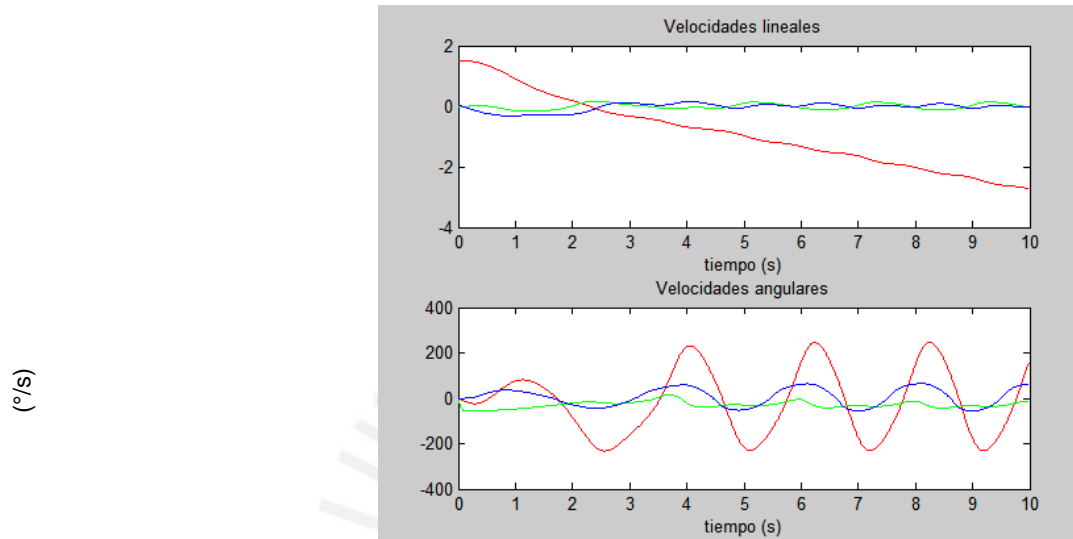


Figura 3.3: Resultados de la simulación: Velocidades lineales y angulares.
Fuente: Elaboración propia usando Matlab.

Para esta simulación el ángulo de entrada del ángulo de pitch (cabeceo) estaba en -20° a una velocidad fija en el eje X de 1.5 m/s. Se definió un tiempo de simulación de 50 s con un periodo de muestreo de 0.01 s (100Hz).

El diagrama de bloques general se muestra en la Figura 3.4: Planta controlada por PID en pitch.

Fuente: Elaboración propia usando Matlab.

Se observa que hay un limitador del timón, a la salida del controlador, esto debido a que los timones, físicamente, solo pueden llegar a ángulos entre $+45^\circ$ y -45° .



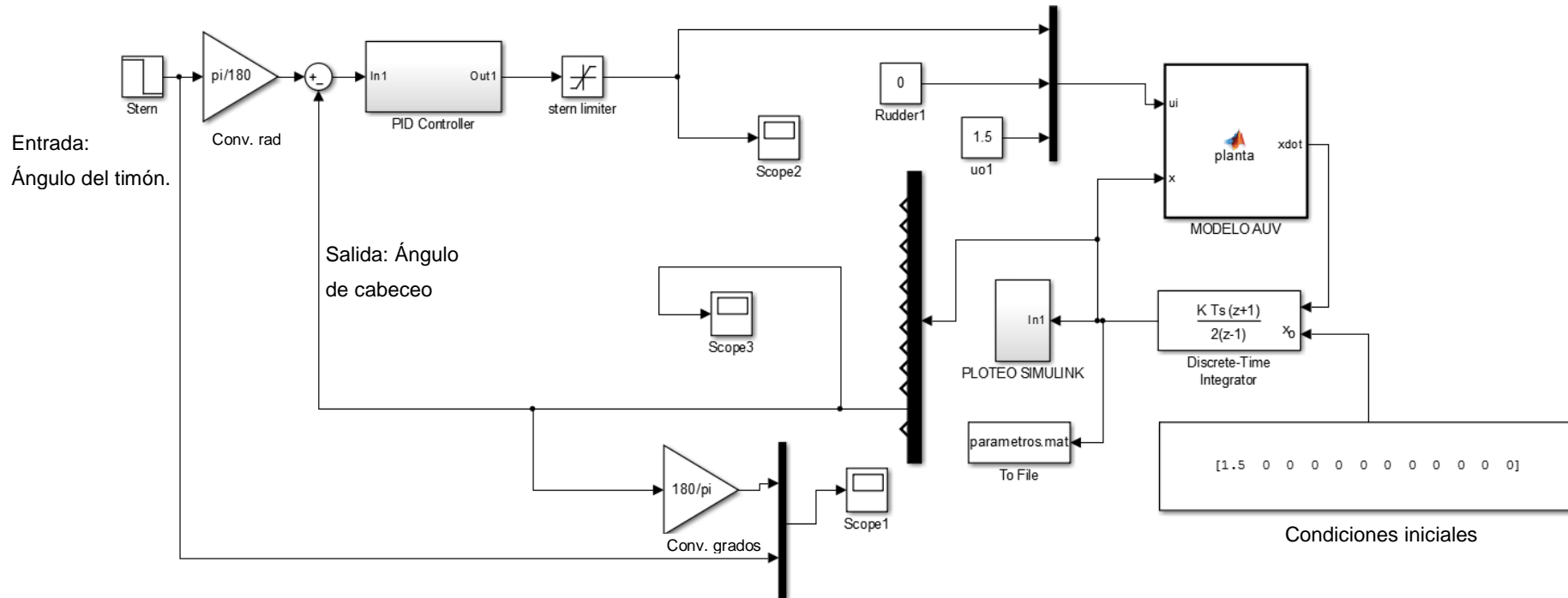


Figura 3.4: Planta controlada por PID en pitch.
 Fuente: Elaboración propia usando Matlab.

Para lograr encontrar los valores del controlador PID para la planta se realizaron varias iteraciones hasta encontrar la respuesta que describa mejor el movimiento del AUV, estos valores fueron: $K_p = -30$, $T_d = 0.5$, $T_i = 0.5$. El diagrama de bloques para el controlador PID se observa en la Figura 3.5.

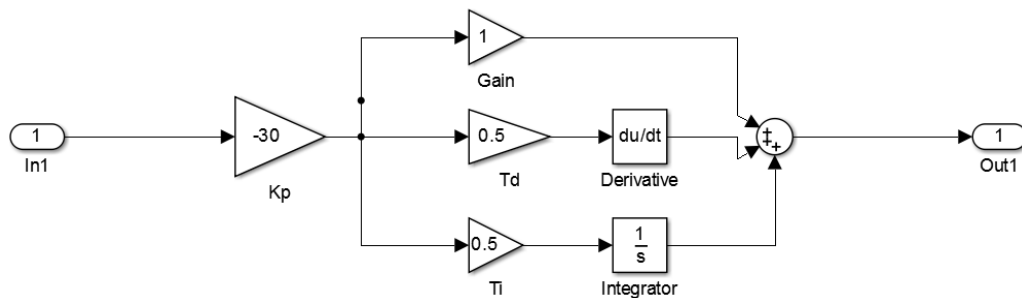


Figura 3.5: PID obtenido mediante iteraciones.
Fuente: Elaboración propia usando Matlab.

Se definen estos valores como definitivos debido a la respuesta que se obtuvo, Figura 3.6, ya que a pesar de presentar un rizo significativo, sí llega a estabilizar en el punto deseado. Se observa que el setpoint, línea morada, está en 20° , y la oscilación descrita por el AUV está estabilizado en el ángulo deseado. Además, se puede observar en la Figura 3.7 el comportamiento del timón vertical.

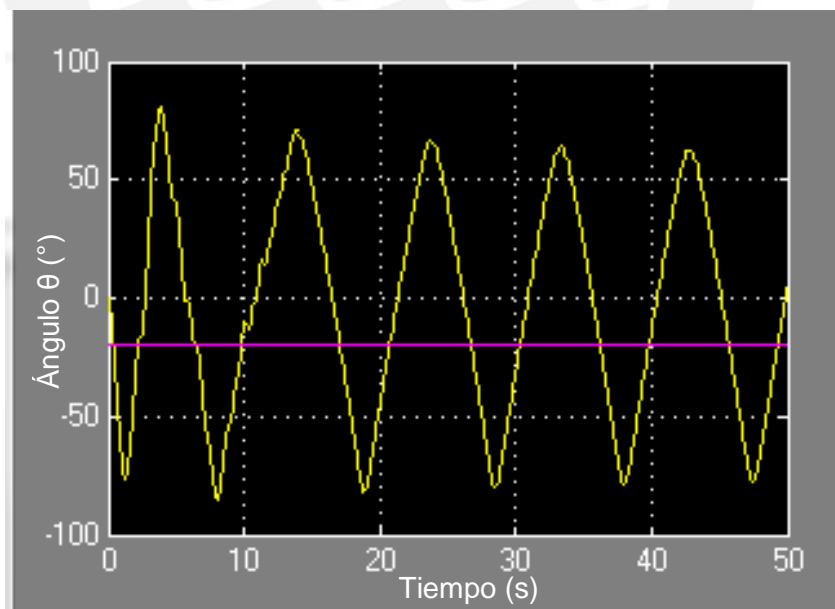


Figura 3.6: Ángulo deseado pitch, ángulo del móvil (θ)
Fuente: Elaboración propia usando Matlab.

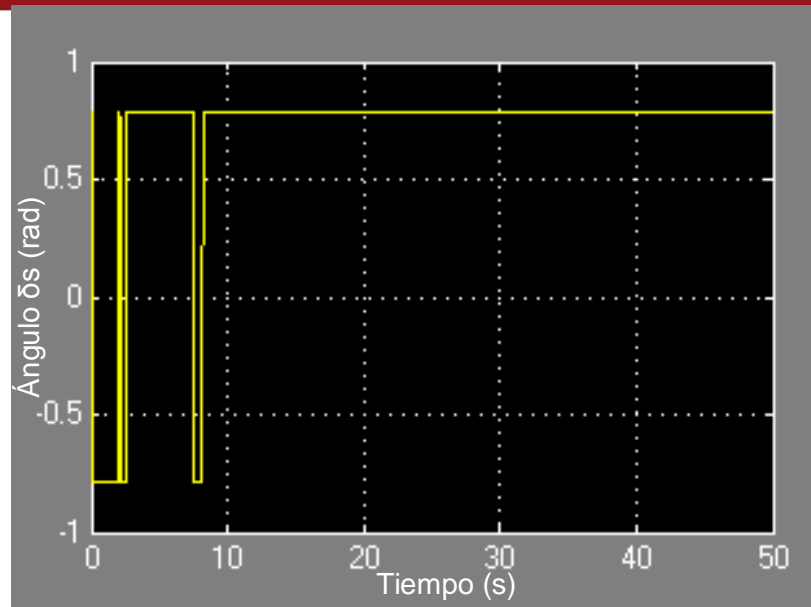
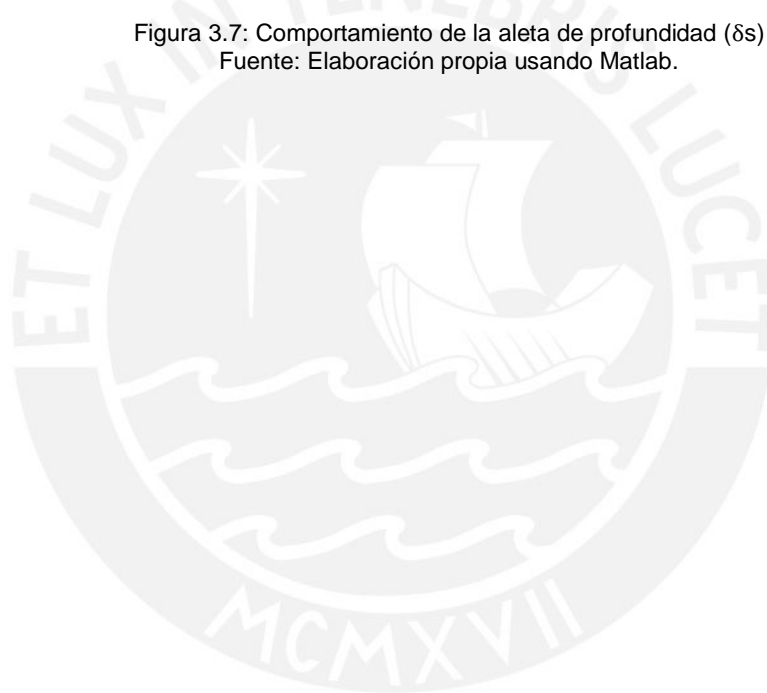


Figura 3.7: Comportamiento de la aleta de profundidad (δs)
Fuente: Elaboración propia usando Matlab.



3.2. Análisis de vibración

En el compartimiento de control del AUV a actualizar, se encontraban los componentes analógicos y diversas tarjetas electrónicas las cuales se necesitaban para realizar el control del móvil. Este arreglo mecánico, mostrado en la Figura 3.8, es un arreglo de cuatro discos circulares de Aluminio ASTM D 3003, unidos por cuatro ejes de acero A36 roscados en los extremos. Además, entre cada placa se encuentran separadores de acero A36.

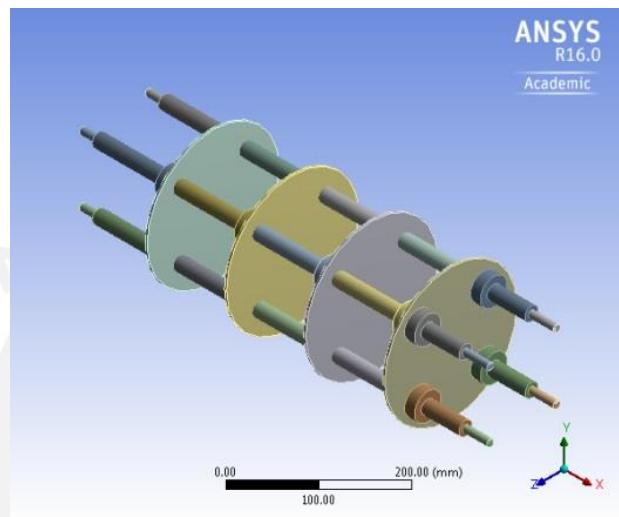


Figura 3.8: Arreglo mecánico de soporte de tarjetas.
Fuente: Elaboración propia usando ANSYS.

En una de estas placas se dispone a ubicar la tarjeta controladora, Beaglebone Black junto con el driver de motores DC para el control de las aletas y timones. Debido a las altas velocidades del AUV, y al balanceo que este puede experimentar se decidió realizar un análisis modal de vibraciones para saber las deformaciones en el eje x, las cuales son las que podrían dañar las tarjetas hasta el punto de quebrarlas.

Esto se realizó con el software ANSYS, del cual se encontró los modos de vibración del arreglo mecánico antes mencionado, mostrado en la Tabla 3.3: Frecuencias correspondientes a cada modo de vibración. Las características de esta simulación, junto con los resultados, se encuentran más detalladas en el ANEXO 2.

Tabla 3.3: Frecuencias correspondientes a cada modo de vibración.
Fuente: Resultado de la simulación usando ANSYS.

Modo de Vibración	Frecuencia (Hz)
Primer	233.7
Segundo	233.75
Tercer	319.07
Cuarto	600.23
Quinto	600.3
Sexto	717.67
Séptimo	1119.1
Octavo	1119.2

De acuerdo a la norma MIL-STD-202G [18] se deben realizar pruebas de vibración con los componentes a utilizar. Las frecuencias existentes en este tipo de AUV van desde los 10Hz hasta los 2000Hz. Es por ello que se analizan los diferentes modos de vibración, desde el primer hasta el cuarto modo. Si bien se ha determinado hasta el octavo modo de vibración, se decide abarcar solo hasta el cuarto modo. Las frecuencias modales mostradas en la tabla anterior, están dentro del rango existente en el AUV, es por ello que es importante corroborar que los desplazamientos, en este caso máximos debido a la frecuencia de resonancia, sean controlados o no sobrepasen valores mínimos. Ya que variaciones altas en el eje X del arreglo, significa que las tarjetas ubicadas en estas planchas, sufren deflexión y esto puede partir la tarjeta o resquebrajar las pista de cobre de las tarjetas.

En las siguientes imágenes, se muestran los resultados en el eje X, se puede observar que la máxima deflexión se da en el modo 4 con 8.45mm. Cabe resaltar que esta deflexión se da en las zonas superiores externas del disco. Notar, que en la zona central de todos los discos, las deformaciones no son mayores que 1.5 mm,

Por lo tanto, la seguridad de las tarjetas no estará comprometida por la vibración si se ubican en estas áreas ya que, como se mencionó anteriormente, está dentro del rango permisible por la norma.

A continuación se presentan las deformaciones en el eje X:

Desplazamientos en Eje X

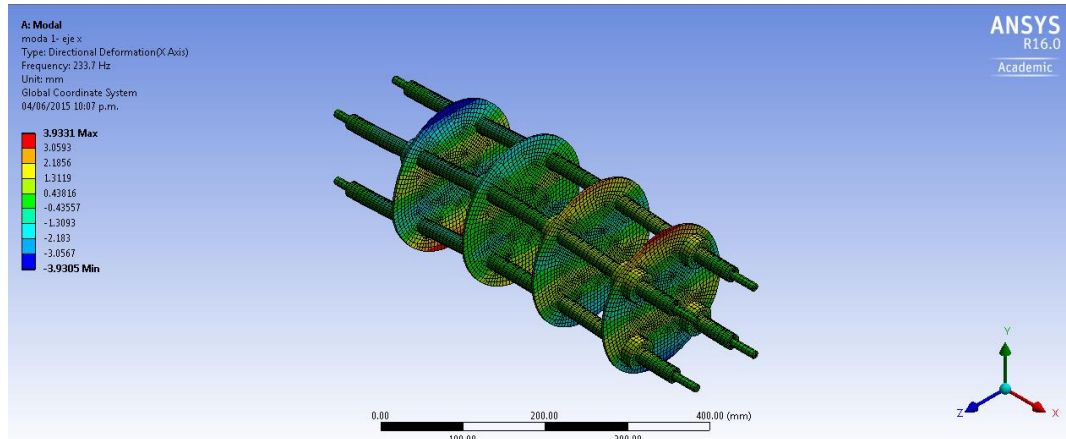


Figura 3.9: Resultado del primer modo de vibración.
Fuente: Elaboración propia usando ANSYS.

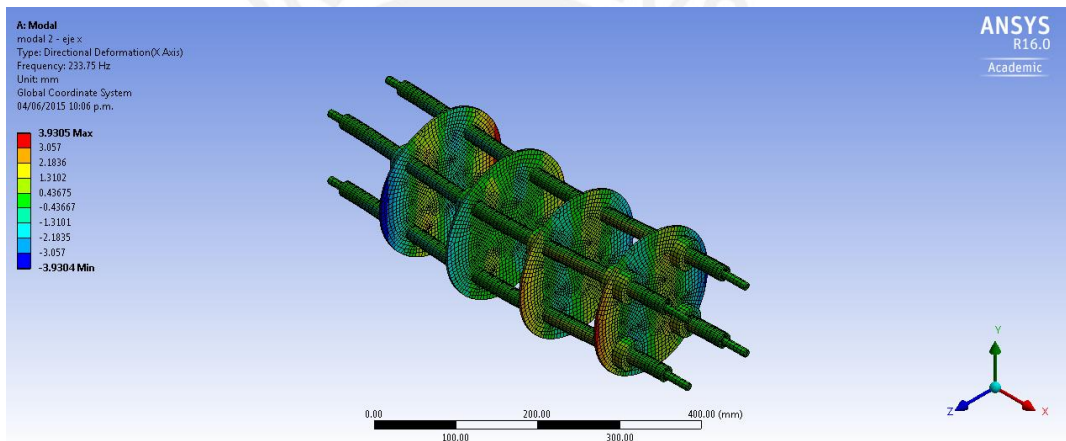


Figura 3.10: Resultado del segundo modo de vibración.
Fuente: Elaboración propia usando ANSYS.

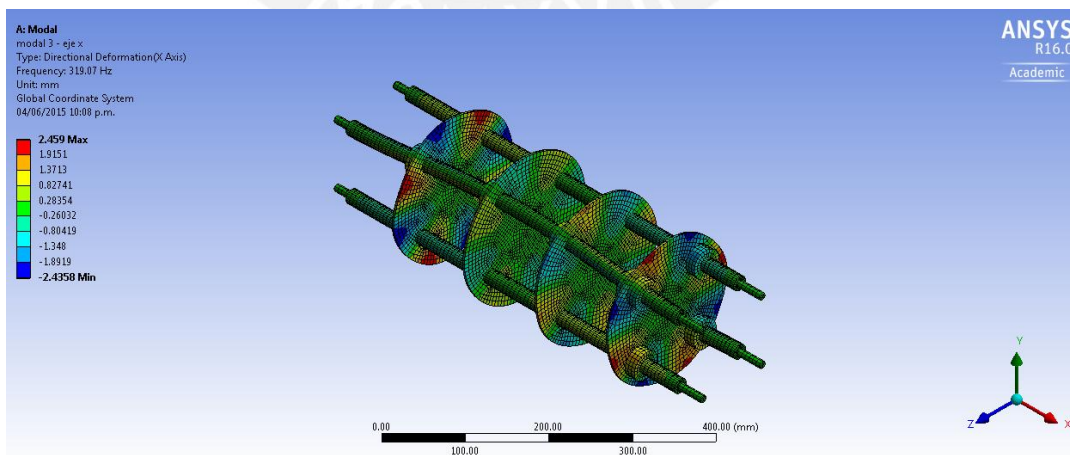


Figura 3.11: Resultado del tercer modo de vibración.
Fuente: Elaboración propia usando ANSYS.

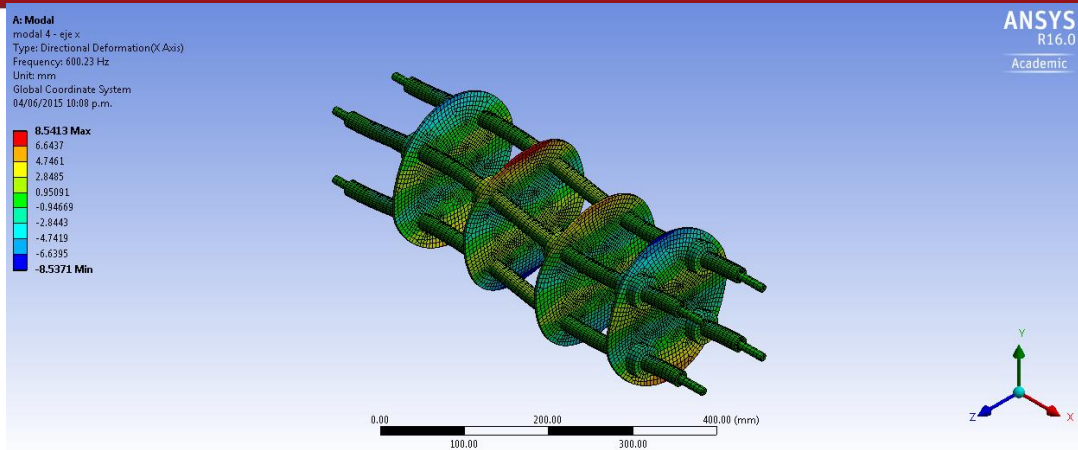


Figura 3.12: Resultado del cuarto modo de vibración.
 Fuente: Elaboración propia usando ANSYS.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



Este trabajo de tesis comenzó con la idea de modificar el sistema de control de un móvil subacuático de alta velocidad. En el desarrollo de la tesis, se presentaron ciertas limitaciones, en cuanto a la obtención de los parámetros hidrodinámicos ya que solo se pueden obtener por medio de experimentación o simulaciones más avanzadas, que escapan de los alcances de la tesis.

En cuanto a los objetivos específicos de la tesis se concluye:

- Se logró diseñar un sistema control PID capaz de corregir el valor que debe alcanzar el AUV para el ángulo de pitch (giro en el eje Y), reconociendo que este mantiene un carácter oscilatorio de rizo alrededor del valor deseado. Lo cual genera una limitante apreciable para la correcta estabilización del sistema.
- Con respecto a los actuadores del AUV, no se pudo determinar en específico un motor para las aletas debido a que no se sabe a qué fuerzas estarán sometidas. Sin embargo, se reconoce la importancia de contar con un motor con el suficiente torque y resolución angular para ponerse en la posición deseada.

En cuanto a los requerimientos del sistema planteados en la tesis se concluye:

- Se encontró un modelo matemático con todos los parámetros necesarios para la simulación y ejecución del algoritmo de control, sin embargo, el AUV en general es un modelo no lineal y altamente oscilante. Es por ello que se debe recurrir a métodos matemáticos más avanzados para la linealización del modelo. Además, las condiciones iniciales del sistema deben ser ajustadas correctamente para que no existan cambios bruscos en las velocidades y ángulos del móvil.
- Se logró confirmar que la distribución de los componentes mecánicos asegura el correcto funcionamiento, si las tarjetas se encuentran en el centro de los platos. Ya que, a pesar de la vibración inherente en el sistema, y que en el rango común para estos vehículos se presentan modos de oscilación que generan desplazamientos máximos en los elementos del sistema, estos no superan el desplazamiento permitido por las normas que regulan las condiciones de los dispositivos eléctricos en vehículos subacuáticos.

- Se diseñó el modelo de control con la finalidad de ser implementado en un solo microcontrolador, en este caso el Beaglebone Black, ya que tiene las mejores capacidades en cuanto a la realización de operaciones de punto flotante. Además, de poseer la velocidad de respuesta necesaria (procesador de 1 GHz) para procesar los datos en tiempo real.

Finalmente, se recomienda para el control óptimo de sistemas no-lineales, implementar un sistema de control adaptativos, como el “sliding mode”, ya que estos deben actuar rápidamente para contrarrestar los efectos no lineales en el sistema.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Peru21, «**Se promulgó ley que favorece innovación.**» *Peru 21*, Marzo 2015. [En línea]. [Consulta: 05 de abril de 2015]
<http://www.newsmonitor.biz/Viewer/postview.aspx?CLI=1&PAU=1229542&CLIP=853259>
- [2] Adolfo Chiri, «**No hay crecimiento del largo plazo que no esté basado en innovación.**» *Gestión, El Comercio*, Diciembre 2013. [En línea]. [Consulta: 04 de Abril de 2015]
<http://gestion.pe/economia/innovacion-adolfo-chiri-no-hay-crecimiento-largo-plazo-que-no-este-basado-2082702>
- [3] NOAA. **OFFICE OF COAST SURVEY.** [En línea]. [Consulta: 02 de abril de 2015]
<http://www.nauticalcharts.noaa.gov/csdl/AUV.html>
- [4] KONGBERG MARITIME. **Autonomous underwater vehicles - AUVs.** [En línea]. [Consulta: 02 de Abril de 2015]
<http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/D5682F98CBFB005AC1257497002976E4?OpenDocument>
- [5] AUVAC. **Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) for Oil & Gas Applications.** [En línea]. [Consulta: 06 de Abril de 2015]
<http://auvac.org/newsitems/view/1769>
- [6] AMERICA'S NAVY. (2005) **Undersea Warfare.** [En línea]. [Consulta: 03 de abril de 2015]
http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_26/uuv.html
- [7] Shah VIKRANT P., "Design Consideration for Engineering Autonomous Underwater Vehicles" *MIT*, 2005. [En línea].
<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/39893>
- [8] Nuno CRUZ and Anibal MATOS, "The MARES AUV, a Modular Autonomous Robot for Environment Sampling" 2008. [En línea].
http://oceansys.fe.up.pt/publications/2008_CruzMatos.pdf
- [9] KONGBERG MARITIME. **Autonomous underwater vehicle - REMUS 600-S.** [En línea]. [Consulta: 05 de Abril de 2015]
<http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/0AE7A0DB9F6C>

DECEC12579A70031E28B?OpenDocument

- [10] Matthew Dunbabin, "**A Hybrid AUV Design for Shallow Water Reef Navigation.**" *Proceedings of the 2005 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, 2005. [En línea].
http://auvac.org/uploads/platform_pdf/CSIRO%20Starbug.pdf
- [11] WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION. (2014) **Hanumant Singh's Lab.** [En línea]. [Consulta: 04 de Abril de 2015]
- [12] D. Wettergreen, "**Development of autonomous underwater vehicle towards visual,**" Australia, 2000.
- [13] Jon C. Ervin, "**Optimization of the Fuzzy Logic Controller for an Autonomous UAV**" *IEEE*, 2002. [En línea].
<http://www.calpoly.edu/~salpteki/Teaching/Parafoil/Ervin.pdf>
- [14] S. Sagatun and R. Johansson, "**Optimal and adaptive control of underwater vehicles**" 1994.
- [15] D. Mills and C. Harris, "**Neurofuzzy modelling and control of a six degree of freedom.**" *University of Southampton*, 1995. [En línea].
<http://eprints.soton.ac.uk/250103/>
- [16] Carlos Rodriguez. **Tecnología Marítima** [Información confidencial confirmada]. [En línea]. [Consulta: 18 de abril del 2015]
<http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2012/11/torpedo-ligero-mark-44.html>
- [17] Timothy PRESTERO, "**Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle.**" 2001.
- [18] Department of Defense, "**Method 204D - Vibration.**" in *MIL-STD-202G.*, 1980.
- [19] Freescale, "**MPC7410/MPC7400 RISC Microprocessor Reference Manual.**" 2008. [En línea].
http://www.freescale.com/files/32bit/doc/ref_manual/MPC7410UM.pdf
- [20] Thor Fossen, "**Guidance and Control of Ocean Vehicles.**" University of Trondheim Norway, 1994.

ANEXOS

ANEXO 1. CODIGO	1
ANEXO 2. PARAMETROS DE LAS VIBRACIONES	5
ANEXO 3. ESPECIFICACIONES TECNICAS	7
ANEXO 4. LISTA DE PLANOS	10

