



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN
FACULTAD DE INGENIERÍA



TESIS

“DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE UN VEHÍCULO ACUÁTICO NO TRIPULADO DEDICADO A LA EXPLORACIÓN DE ZONAS COSTERAS”

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA:

SERGIO RAÚL NOH CAAMAL

CIUDAD DEL CARMEN, CAMPECHE, NOV. 2019



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
CARMEN
FACULTAD DE INGENIERÍA**



TESIS

“DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE UN VEHÍCULO ACUÁTICO NO TRIPULADO DEDICADO A LA EXPLORACIÓN DE ZONAS COSTERAS”

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA:

SERGIO RAÚL NOH CAAMAL

DIRECTOR DE TESIS
DR. JOSÉ LUIS RULLÁN LARA

CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. HUSSAIN ALAZKI

CIUDAD DEL CARMEN, CAMPECHE, NOV. 2019



Universidad Autónoma del Carmen

Ciudad del Carmen, Cam., Méx.

Av. Central S/N Esq. Con Fracc. Mundo Maya
C P. 24115 Tel. 38 1-10-18 ext.1702, 1703



29 de noviembre de 2019
Oficio No. FIYT/2672/19

C. Sergio Raúl Noh Caamal. Matrícula: 172509
Egresado de la Maestría en Ingeniería Mecatrónica
PRESENTE.-

Por éste medio nos dirigimos a usted para notificarle que habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora de Tesis le hizo respecto a su trabajo titulado:

"DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL DE LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE UN VEHÍCULO ACUÁTICO NO TRIPULADO DEDICADO A LA EXPLORACIÓN DE ZONAS COSTERAS"

- Capítulo I Introducción y Estado del Arte.
- Capítulo II Modelo Matemático del Vehículo.
- Capítulo III Desarrollo de la Plataforma Experimental: Delfín Explorador I.
- Capítulo IV Sistema electrónico embarcado.
- Capítulo V Resultados.
- Capítulo VI Conclusiones.
- A. Código G
- B. Mach3
- C. GPIO
- D. T-200
- E. Pruebas Adicionales con la Ley de Control PD
- F. Artículo

Se le concede la autorización para que proceda la impresión del mismo.

Presidente de la Comisión Revisora de Tesis

Dr. José Luis Rullán Lara



FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Antonio Alvarez Arellano
Director

Secretaría Administrativa

L.A.E. Amelia del Carmen García García

C.c.p. Archivo.
JAAA/ACGG/ncab*

Dedicatoria

A las Autoridades del Instituto Tecnológico de Lerma, que me otorgaron las facilidades para llevar a cabo este proyecto profesional

Agradecimientos

A mi director de tesis y co-director, Dr. José Luis Rullán Lara y Dr. Hussain Alazki, por su constante apoyo en el desarrollo de este interesante proyecto. Por generar las condiciones apropiadas.

Al Cordinador de la Maestría en Ingeniería Mecatrónica, Dr. Marco A. Rodríguez Blanco por su excelente acompañamiento en mi tránsito por la UNACAR.

A todos los Profesores, que siempre mantuvieron un alto desempeño dentro y fuera del aula

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un vehículo acuático no tripulado para áreas costeras (aguas poco profundas). La embarcación está basada en el tipo catamarán con dimensiones pequeñas capaz de navegar en ambientes marinos en áreas costeras donde la navegación y exploración de los vehículos sumergibles está limitada. Se trata de un vehículo sub-actuado lo que reduce el consumo energético para proporcionarle mayor autonomía de navegación. Debido a las perturbaciones ambientales en las que opera este vehículo, como el oleaje, corrientes inducidas y viento, se restringen las características del diseño. De manera conveniente, se eligen los sensores, actuadores y tarjeta de control de este vehículo acordes al ambiente de operación. Tanto el diseño como la navegación del vehículo acuático no tripulado se valida de manera experimental, para ello se aplica un control clásico.

Índice general

1. Introducción y estado del arte	1
1.1. Introducción	1
1.2. Estado del Arte	2
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivo General y objetivos específicos	6
1.5. Alcance del trabajo	7
1.6. Metodología Desarrollada	7
1.7. Organización de la Tesis	8
2. Modelo matemático del vehículo	9
2.1. Sistemas coordenados	9
2.2. Cinemática	11
2.3. Cinética	12
2.3.1. Fuerzas hidrodinámicas	13
2.3.2. Fuerzas y momentos de restauración	14
2.3.3. Fuerzas y momentos de perturbaciones externas	16
2.3.4. Fuerzas y momentos de propulsión	16
2.4. Reducción del modelo a tres grados de libertad	17
2.5. Control del USV	18
2.5.1. Efectos de los términos del control PID	19
2.5.2. Características de los controladores	19
2.6. Ley de control del USV	21
3. Desarrollo de la plataforma experimental: Delfin Explorador I	23

3.1. Diseño y manufactura de un producto	23
3.1.1. Impresión 3-D	25
3.1.2. Control Numérico por Computadora	29
3.2. Solidworks®	31
3.2.1. Conceptos básicos	31
3.2.2. Gestor de diseño	33
3.2.3. Exportación de archivos de impresión en 3D	33
3.2.4. Generación de archivo para CNC	34
3.3. Diseño del Delfin Explorador I	34
3.4. Construcción del prototipo	35
3.4.1. Elaboración de soportes y chumaceras en polietileno	35
3.4.2. Elaboración de los cascos en 3-D	37
3.4.3. Elaboración del Molde	38
3.4.4. Elaboración de la base central	39
3.4.5. Elaboración de los cascos en fibra de vidrio	39
3.4.6. Construcción del Mecanismo para instrumentos de batimetría	41
3.4.7. Montaje de soporte de Propulsores	41
3.5. Prototipo Delfin I	42
4. Sistema electrónico embarcado	43
4.1. Diagrama a bloques del sistema embarcado	43
4.2. Subsistema de procesamiento	44
4.2.1. Configuración de la Raspberry PI 3 B	45
4.2.2. Lenguaje de programación	45
4.3. Subsistema de Posición	46
4.4. Subsistema de Orientación	46
4.5. Subsistema de actuadores	47
4.6. Resumen de los circuitos seleccionados	49
5. Resultados	51
5.1. Pruebas del casco	51
5.2. Prueba del sistema electrónico embarcado	53

5.2.1. Prueba experimental de sensores	53
5.2.2. Prueba de sensores y actuadores	56
5.3. Prueba de la ley de control PD	59
6. Conclusiones	67
6.1. Trabajo Futuro	68
A. Código G	77
B. Mach3	81
C. GPIO	83
D. T-200	85
E. Pruebas adicionales con la ley de control PD	87
F. Artículo	89

Índice de figuras

1.1. USV's recuperado de [1]	2
1.2. USV (recuperado [2])	3
1.3. USV CC y Red USV (recuperados de [2])	4
1.4. UWG (recuperado de [3])	5
1.5. USV Delfin Explorador I de la UNACAR recuperado de [4]	6
2.1. Descripción de los seis grados de libertad. Tomada de [5]	10
2.2. Diagrama de fuerzas de restauración y puntos de aplicación	15
2.3. Diagrama a bloques del PID recuperado de [6]	18
3.1. Proceso de manufactura complejo	24
3.2. Proceso de manufactura, recuperado de [7]	26
3.3. Impresora Darwin, recuperado de [8]	26
3.4. ABS resuperado de [9]	28
3.5. Cenicero de aluminio, recuperado de [10]	30
3.6. Estructura de un bloque en G	30
3.7. Módulos existentes en SolidWorks®	32
3.8. Delfin I	34
3.9. Delfin I y sus vistas	35
3.10. Diseño de los soportes y Fresadora CNC, recuperado de [7]	36
3.11. Proceso de corte del juego de soportes	36
3.12. Proceso de corte de juego de chumaceras	37
3.13. Impresión de la popa del USV	37
3.14. Impresión por secciones	38
3.15. Impresión de total de las secciones	38

3.16. Molde de concreto	39
3.17. Base central	39
3.18. Molde-concreto y Casco-fibra de vidrio	40
3.19. Mecanismo para instrumentos	41
3.20. Montaje de los propulsores	41
3.21. Delfin I. Se muestran los actuadores	42
4.1. Diagrama a bloques del sistema electrónico del USV	44
4.2. Raspberry Pi 3 B recuperado de [11]	44
4.3. GPS de U-blox	46
4.4. Conexión de IMU con arduino recuperado de [12]	47
4.5. Conexión de los propulsores recuperado de [13]	48
4.6. Conexión Módulo PWM a los actuadores recuperado de [12]	49
4.7. Datos del GPS en Arduino y Raspberry Pi	49
4.8. Circuitos que integran la electrónica del USV, imágenes recuperadas de [14], [15], [13], [12], [11]	50
5.1. Prueba experimental de flotabilidad	52
5.2. Línea deflotación	52
5.3. Delfin 1 integrado	53
5.4. Prueba del GPS	54
5.5. Prueba de la IMU	55
5.6. Diagramas de flujo empleado en las pruebas experimentales	56
5.7. Curva característica de los propulsores	57
5.8. Prueba de sensores y actuadores, GPS	58
5.9. Prueba de sensores y actuadores, IMU	58
5.10. Diagrama de flujo del PD	60
5.11. Estados deseados η_d del USV cuando inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$	61
5.12. Error para las variables x, y y ψ cuando el USV inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$	61
5.13. Señales en los servomotores y propulsores del cuando el USV inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$	62
5.14. Trayectoria cuando el USV inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$	62
5.15. Estados deseados del USV, η_d	63

5.16. Error para las variables x , y y ψ del USV	64
5.17. Señales en los servomotores y propulsores del USV	64
5.18. Trayectoria del USV	65
B.1. Match 3 es la versión de programa empleado para este trabajo, recuperado de [16]	81
C.1. La numeración de los pines GPIO no está en orden numérico, recuperado de [11]	83
D.1. Detalles técnicos del T-200, recuperado de [13]	85
E.1. Pruebas adicionales con el PD	87

Índice de tablas

2.1. Notación SNAME (1950)	10
3.1. Resumen de dimensiones en metros	35
4.1. Terminales de la IMU	47
4.2. Interconexiones entre dispositivos	50
5.1. Resultados de la prueba de flotabilidad	52
5.2. Valores experimentales de las ganancias del controlador, con el USV al sur	63
5.3. Valores experimentales, con el USV al norte	65
A.1. Significado del código G en un programa de CNC	78

Lista de acrónimos y símbolos

Lista de acrónimos

ASC *Autonomous Surface Craft*, Embarcación Autónoma de Superficie

AUV *Autonomous Underwater Vehicle*, Vehículo Subacuático Autónomo

CNC *Computerized Numerical Control*, Control Numérico Computarizado

IMO *International Maritime Organization*, Organización Marítima Internacional

NC *Numerical Control*, Control Numérico

NMEA *National Marine Electronics Association*, Asociación Nacional de Electrónica Marina

PD *Proportional Derivative*, Proporcional Derivativo

PID *Proportional Integral Derivative*, Proporcional Integral Derivativo

PLA *Poly Lactic Acid*, Ácido poliláctico

RHS *Rectangular Hollow Sections*, Perfil Tubular Rectangular

ROV *Remote Operated Vehicle*, Vehículo Operado a Distancia

SMC *Sliding Mode Control*, Control por Modos Deslizantes

SSH *Secure Shell*

USV *Unmanned Surface Vehicle*, Vehículo de Superficie no Tripulado

UUV *Unmanned Undersea Vehicle*, Vehículo Submarino no Tripulado

UWG *Unmanned Wave Glider*, Planeador de Olas no Tripulado

VNC *Virtual Network Computing*, Computación Virtual en Red

Lista de símbolos

$C_A(v)$ Matriz de coriolis y fuerzas centripetas hidrodinámicas. [N/A]

$D(v)$ Matriz de arrastre hidrodinámico o de amortiguamiento lineal potencial. [N/A]

K_d Ganancia derivativa. [N/A] [m, rad]

K_p Ganancia proporcional. [N/A]

p, q, r Velocidades angulares alrededor de los tres ejes de un plano tridimensional. [rad/s]

u, v, w Velocidades lineales en los tres ejes de un plano tridimensional. [m/s]

X, Y, Z Fuerzas inducidas en los tres ejes de un plano tridimensional. [N]

η Vector de posición y orientación de un cuerpo rígido. [m, rad]

τ Vector de fuerzas y momentos de propulsión. [N;Nm]

Capítulo 1

Introducción y estado del arte

1.1. Introducción

La robótica marina se está volviendo más popular a medida que aumenta la necesidad de comprender el entorno marino tanto por razones científicas como económicas. Hay un número considerable de grupos de investigación en todo el mundo que contribuyen a la investigación de la robótica marina mediante el desarrollo de sus propias plataformas marinas autónomas subacuáticas y de superficie¹ que se utilizarán para probar los escenarios y algoritmos previstos.

Actualmente, ha crecido la utilización de vehículos autónomos para auxiliar o suplir muchas tareas por tierra, aire y mar, ahí donde las condiciones físicas dificultan el acceso humano. Por autonomía se entiende que el vehículo es capaz de decidir sin supervisión humana.

Diversos campos de investigación relacionados con el mar han surgido: estudio de los ecosistemas, arqueología submarina, explotación de los recursos, etc. Cada campo de investigación impone retos, restricciones y condiciones. En las últimas décadas, han sido desarrollados vehículos autónomos sumergibles (AUV por sus siglas en inglés, Autonomous Underwater Vehicles) orientados a la exploración submarina. Sus antecesores, los vehículos operados de forma remota (ROV por sus siglas en inglés, Remote Operated Vehicles) aún se utilizan, pero la limitante de la longitud y peso del cable los hace menos atractivo en tareas que requieren una mayor cobertura.

Los Vehículos de Superficie no Tripulados por sus siglas en inglés (Unmanned Surface Vehicle, USV) son embarcaciones destinadas a operar en la superficie de agua. Las aplicaciones de los USV incluyen monitoreo ambiental, mapeo del fondo marino y son importantes cuando se desean realizar estudios de

¹Entiéndase de superficie, una plataforma acuática que permanece sobre el agua y en contacto permanente con ella

oceanografía.

1.2. Estado del Arte

En 1991 cuando Thor I. Fossen [17] incursionó en el modelado de vehículos marinos, se describió el modelado no lineal y control de vehículos submarinos unificando conceptos de mecánica clásica e hidrodinámica para obtener el modelo dinámico cinemático y cinético de un submarino. La importancia de este trabajo radica en proporcionar un diseño generalizado aplicable no solo a submarinos, sino también a barcos. Se presenta un modelo no lineal de seis grados de libertad, así como un análisis de perturbaciones y estabilidad basado en un modelo linealizado a partir del modelo no lineal.

En el Programa Sea Grant College del MIT (Massachusetts Institute of Technology), el Autonomous Surface Craft (ASC) se desarrolló por primera vez en 1993 y se diseñó para varias misiones. El primer proyecto fue denominado “ARTEMIS” (Fig. 1.1a), que era una réplica a escal 1/17 de un barco pesquero [18]. El objetivo de este USV fue recopilar datos de batimetría en el río Charles en Boston. ARTEMIS sirvió bien como plataforma de prueba, pero su pequeño tamaño lo hizo inadecuado para la investigación costera y de océano abierto. La velocidad de crucero, el alcance, la carga útil y la estabilidad se mejoraron en la plataforma ASC de segunda generación.



(a) Artemis (recuperado de web.mit.edu)

(b) Autocat (recuperado de www.researchgate.net)

Figura 1.1: USV's recuperado de [1]

En 1996 el MIT desarrolló el vehículo “ACES”. Para proporcionar una mayor estabilidad al balanceo y una mayor carga útil, se seleccionó un catamarán como la mejor forma de casco para el nuevo ASC. El haz ancho y el gran área del casco en la cual el barco está a flote de los catamaranes reduce

los movimientos de rodadura y aumenta el desplazamiento sin la penalización de arrastre significativa que un monocasco de tamaño similar experimentaría. Este diseño también tenía la virtud de proporcionar redundancia en la flotación del casco. La falla de un casco no da como resultado una pérdida completa de flotabilidad. El casco restante podría mantener el ASC a flote el tiempo suficiente para ser rescatado. La estabilidad de alabeo durante las pruebas fue buena. ACES en curso reveló que no experimentó movimientos de inclinación significativos. ARTEMIS tuvo un alabeo estimado entre 15 a 20 grados, el alabeo de ACES no fue mayor a 10 grados; esto ocurrió solo cuando el ASC cruzó estelas de lanchas a motor significativas que habrían sido peligrosas para ARTEMIS.

En verano de 2000 se probó el “AUTOCAT” (Fig. 1.1b) y fue usado en aguas poco profundas.

Otro ejemplo, es el denominado “ROAZ”, una embarcación de doble casco y fue diseñado para operar en ríos, estuarios y presas [19]. El vehículo fue desarrollado en estructura de fibra de vidrio. Los propulsores están montados externamente en popa (Fig. 1.2a). Se implementó una configuración de doble casco para permitir capacidades de acoplamiento AUV (autonomous underwater vehicles) adecuadas. Se muestra ROAZ II (Fig. 1.2b), que ha apoyado encuestas y operaciones en red con UUV (unmanned undersea vehicle).



(a) ROAZ I

(b) ROAZ II

Figura 1.2: USV (recuperado [2])

Además de las plataformas tipo catamarán, existen diversos diseños. La empresa C-C Technologies en colaboración con ASV, Ltd. han diseñado una plataforma semisumergible para aplicaciones de levantamiento hidrográfico, (Fig. 1.3a). Este diseño utiliza solo un casco. La mayor parte del USV está sumergido con solo un mástil para comunicaciones y toma de aire que sobresale por encima del agua. Este diseño permite el uso de sistemas de propulsión de combustión interna, grandes volúmenes de carga útil y excelente estabilidad pasiva. C-C Technologies ha utilizado AUV con éxito para encuestas comerciales

y científicas y se pueden esperar aplicaciones similares de este USV.

La Marina de los Estados Unidos inició su trabajo con UUV mucho antes que con los USV. La posición de USV en la interfaz aire-mar les permite realizar transmisiones de radiofrecuencia en transmisiones aéreas y acústicas submarinas. Es probable que los USV funcionen como nodos de red en aplicaciones navales. En la Fig.1.3b se muestra tres USV "kayak" desarrollados por el MIT en funcionamiento en red en el río Charles de Boston.



(a) C-C-Technologies

(b) Tres kayak operando en Red

Figura 1.3: USV CC y Red USV (recuperados de [2])

Debido a que los USV's están expuestos a disturbios ambientales tales como el viento y oleaje, es importante considerar estos efectos al momento de elegir la técnica de control [20]. La potencialidad de los USV's se prevé también en las actividades civiles de transporte, monitoreo y exploración de zonas costeras y aguas poco profundas, en contraste con otro tipo de vehículos, como los sumergibles, con capacidad de acceso limitado. Ya que los USV's tienen la capacidad de navegar a partir de un mapa predefinido, es importante la investigación y desarrollo en estos sistemas encaminados a la sustitución del trabajo humano en áreas de aguas poco profundas Liu [21].

Las plataformas tradicionales (buque de investigación, vehículo de superficie no tripulado, vehículo submarino, etc.) toman combustible o batería como fuentes de energía. Sin embargo, hay abundantes recursos de energía verde en los océanos [22]. En los últimos años, cada vez más investigadores prestan atención para tomar la energía oceánica como fuentes de energía de los vehículos oceánicos. De hecho, muchas investigaciones sobre vehículos no tripulados con energía oceánica, principalmente sobre vehículos submarinos con energía solar, vehículos submarinos con energía térmica, vehículos de superficie no tripulados con energía eólica o solar y con olas. En la Fig. 1.4 se muestra el UWG (Unmanned Wave

Glider) un nuevo tipo de vehículo oceánico no tripulado propulsado por olas. Tiene muchas ventajas sobresalientes como resistencia infinita, autonomía, descarga cero, bajo costo, entre otros.

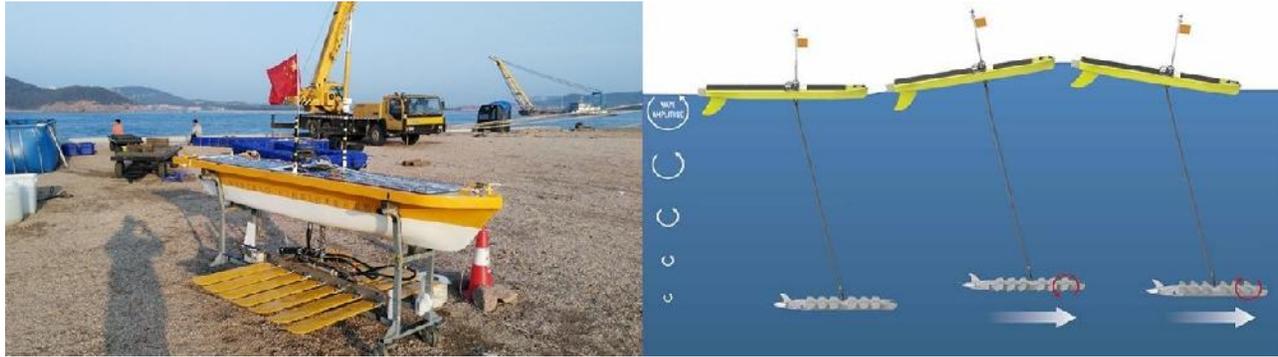


Figura 1.4: UWG (recuperado de [3])

Como puede observarse, los vehículos marinos no tripulados cobran mayor interés en investigaciones oceánicas costa afuera, pero también en aguas interiores como ríos o lagos. Una de las ventajas en las aguas internas o costeras, es su capacidad de acceder a zonas de difícil acceso humano y con plataformas de menor dimensión.

En la región sur del Estado de Campeche, la isla del Carmen se encuentra ubicada entre el Golfo de México en su lado norte y la Laguna de Términos en su lado sur.

Esta ubicación geográfica proporciona una gran riqueza ecológica, pero también una gran oportunidad para los USV de demostrar su potencial en exploración e investigación costera.

En [4] se presenta el diseño de un USV tipo catamarán, diseñado específicamente para la zona costera de la isla del Carmen, y se contempla la instalación de algún dispositivo para el monitoreo y estudio del lecho marino, dispone de un mecanismo que permitirá sumergir dicho dispositivo y retirarlo cuando lo requiera el usuario (Fig. 1.5).

El Delfín Explorador I tiene dimensiones de 1.58 m de eslora. Estas dimensiones son adecuadas para zonas costeras con mangle, por ejemplo.

1.3. Justificación

Las investigaciones y el esfuerzo de las Instituciones por conservar las áreas naturales protegidas ha sido notorio; sin embargo, el reto es grande. La participación de la sociedad es fundamental para el aprovechamiento sustentable de los recursos, cuidado y protección. Por tanto, es necesaria la colaboración de las Instituciones Académicas y de Investigación con tareas específicas que permitan sustentar la toma

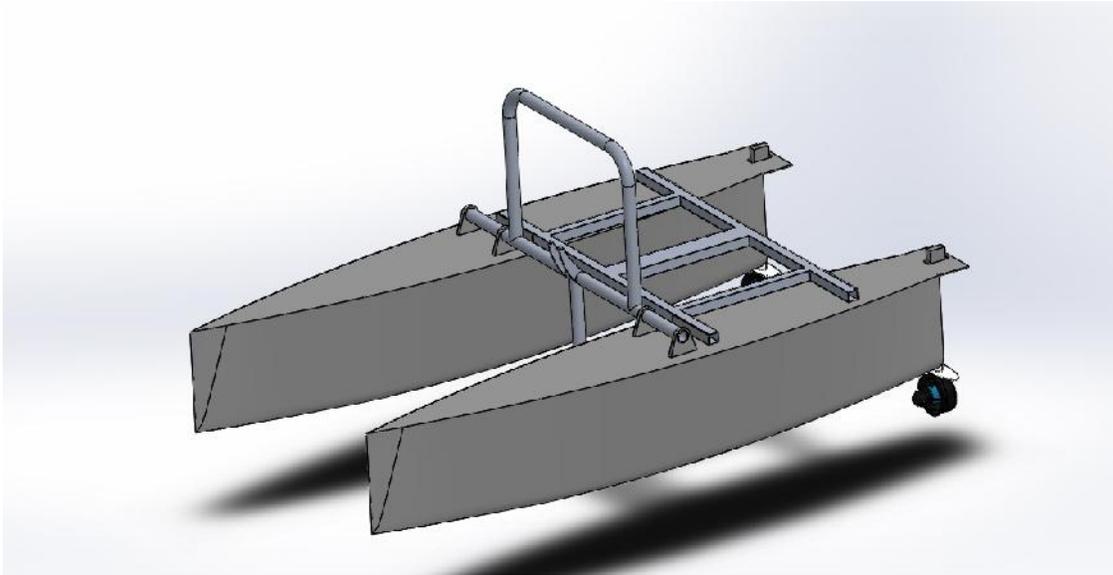


Figura 1.5: USV Delfin Explorador I de la UNACAR recuperado de [4]

de decisiones para los tres órdenes de Gobierno. Desde nuestro ámbito de trabajo, se propone el diseño y la implementación de un vehículo no tripulado como medio para la recolección permanente de datos e información, que permita a otros centros de Investigación interesarse o continuar con el estudio de estos ecosistemas. Además, debido a la poca profundidad que caracteriza a la Laguna de Términos se requiere un vehículo de desplazamiento sobre la superficie, adaptado a este tipo de condiciones.

Los USV se aplican en el campo militar, inteligencia, vigilancia y operaciones de reconocimiento [23]. Estos vehículos tienen mayor autonomía y capacidad de carga útil, lo que permite transportar una variedad de equipos de medición. Su efectividad en navegación es atractiva si se desea monitorear mayores volúmenes de agua a diferencia de las boyas que están restringidas al monitoreo permanente de una coordenada fija.

1.4. Objetivo General y objetivos específicos

Objetivo general

Diseñar e implementar experimentalmente la navegación autónoma de un vehículo acuático no tripulado dedicado a la exploración de la biodiversidad marina en aguas poco profundas y la obtención de información batimétrica.

Objetivos específicos

1. Diseñar y construir un vehículo acuático no tripulado autopropulsado, gobernable y maniobrable.
2. Implementar los algoritmos de navegación
3. Simular en Matlab
4. Validar experimentalmente la navegación autónoma del vehículo acuático no tripulado.

1.5. Alcance del trabajo

A la fecha, no se cuenta en la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR) con una embarcación tipo catamarán para realizar pruebas experimentales de los resultados teóricos de estudios relacionados con el objetivo general. En este sentido, se pretende sentar parte de las bases que permitan desarrollar nuevas investigaciones.

Además, las pruebas experimentales permitirán obtener información valiosa de parámetros y comportamiento del USV en un ambiente no adverso, estos datos podrán ser analizados buscando especificar rasgos importantes del comportamiento.

1.6. Metodología Desarrollada

Etapas 1: Revisión Bibliográfica y estado del arte. En la primera etapa se lleva a cabo el estudio y análisis matemático del vehículo, iniciando desde los principios matemáticos del movimiento de cuerpos rígidos en el espacio. A partir de este estudio, se obtuvo la forma general de un modelo matemático para un vehículo autónomo no tripulado. Y se seleccionó el tipo de embarcación a construir, la cual se toma de [4].

Etapas 2: Construcción de la estructura del vehículo acuático no tripulado. Tomando la estructura de [4], se construyen los cascos y la estructura metálica del vehículo. Para la construcción de los cascos se recurre al uso de una impresora 3-D para obtener los perfiles principales y posteriormente los moldes. Esta etapa se describe más a detalle en el Capítulo 3. La manufactura del sistema se realiza con los materiales adecuados para asegurar el sellado hermético y la flotabilidad .

Etapa 3: Selección e integración de sensores y actuadores. En esta etapa se averigua las tecnologías actualizadas y de mayor accesibilidad económica. Pero, simultáneamente se analiza la compatibilidad tecnológica, dimensiones y características eléctricas.

Etapa 4: Implementación de los algoritmos de control. El algoritmo de interés es el propuesto en [4]. Para este proceso se hace uso de una Raspberry Pi y del Software Python™. El programa se desarrolla aprovechando que viene instalado por defecto en el sistema operativo de Raspbian, es decir, para los usos que se persiguen no existen problemas de incompatibilidad.

Etapa 5: Validación experimental del algoritmo de navegación autónoma. La validación experimental de la navegación autónoma de la plataforma desarrollada se realizará en condiciones de poco o nulo oleaje. Se determinan los parámetros del controlador de forma experimental.

1.7. Organización de la Tesis

La tesis consta de cinco capítulos. En el primer capítulo se abordan los antecedentes y el estado del arte los vehículos de superficie no tripulados. El segundo capítulo trata del modelo matemático del USV a tres grados de libertad, así como del algoritmo de control deseable para este tipo de USV.

El tercer capítulo se dedica al proceso de construcción del prototipo: los cascos, el elemento de unión entre los cascos y chumaceras, por tanto, al principio de este capítulo se abordan brevemente las tecnologías empleadas. Los dispositivos eléctricos y electrónicos necesarios para el funcionamiento del USV se determinan en el capítulo cuatro.

En el capítulo cinco, se establecen los resultados de las pruebas experimentales en un ambiente controlado, en la piscina de la Universidad Autónoma del Carmen.

Capítulo 2

Modelo matemático del vehículo

En este capítulo, el interés es elegir el tipo de control para el USV, “Delfin Explorador I” ; pero, es importante presentar las investigaciones realizadas en este campo. Por tanto, se inicia con el sistema de coordenadas para comprender, posteriormente, el modelo dinámico del USV.

En el proceso de la elección del tipo de control, se hace referencia al control clásico, para ello se lleva a cabo una evaluación cualitativa de los controladores P, PI y PD. Se advierte que este tipo de control deberá operar de forma conjunta con otro bloque para asignar de forma correcta las señales a los actuadores.

2.1. Sistemas coordenados

Cualquier vehículo marino es capaz de rotar sobre tres ejes imaginarios perpendiculares Fig. (2.1). EL punto donde coinciden esos ejes se denomina centro de gravedad. El eje longitudinal se prolonga, de popa a proa (x_b); el transversal, de babor a estribor (y_b) y el vertical, es el que pasa por el centro de gravedad y es perpendicular a los dos ejes anteriores (z_b). Alrededor de estos tres ejes, se generan rotaciones básicas del vehículo marino, las cuales se describen a continuación:

- La rotación sobre el eje x_b se denomina alabeo (roll en inglés) y se denota por la variable ϕ .
- La rotación sobre el eje y_b se denomina cabeceo (pitch en inglés) y se denota por la variable θ .
- La rotación sobre el eje z_b se denomina quiñada (yaw en inglés) y se denota por la variable ψ .

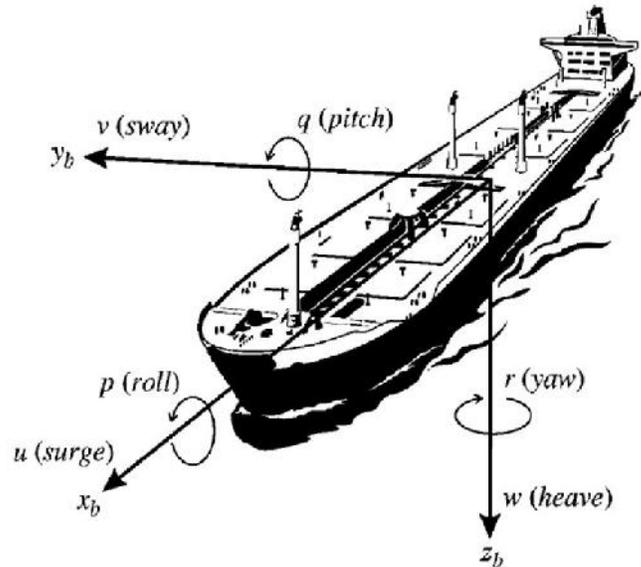


Figura 2.1: Descripción de los seis grados de libertad. Tomada de [5]

Las tres coordenadas (x ; y y z) y sus derivadas con respecto al tiempo se usan para describir las posiciones y velocidades traslacionales del cuerpo a lo largo de los ejes XYZ, en tanto, ϕ , θ y ψ y sus respectivas derivadas describen la orientación y las velocidades angulares alrededor de los ejes XYZ. Para esto se utiliza la notación SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1950) como se presenta en la Tabla 2.1

Tabla 2.1: Notación SNAME (1950)

Grado de libertad		Fuerzas y movimientos	Velocidades lineal y angular	Posiciones y ángulos de euler
1	Movimiento en dirección de x (surge)	X	u	x
2	Movimiento en dirección de y (sway)	Y	v	y
3	Movimiento en dirección de z (heave)	Z	w	z
4	Rotación sobre x (roll, heel)	K	p	ϕ
5	Rotación sobre y (pitch, trim)	M	q	θ
6	Rotación sobre z (yaw)	N	r	ψ

A partir de la tabla anterior se definen los vectores:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\eta_1 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad \eta_2 = \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$v_1 = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$\tau_1 = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad \tau_2 = \begin{pmatrix} K \\ M \\ N \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Donde v y η son los vectores de posición y velocidad generalizadas que describe los movimientos en seis grados de libertad.

Para describir las ecuaciones de movimiento se emplean dos marcos de referencia. Marco de referencia inercial y marco de referencia al cuerpo. Se sabe que un sistema es inercial cuando están fijos o tienen un movimiento relativo uniforme y, es no inercial cuando está sometido a aceleraciones. El marco de referencia fijo al cuerpo es un marco de coordenadas móviles que se fija al USV. Las velocidades lineales y angulares de la nave se expresan para el sistema de coordenadas fijo del cuerpo y, la posición y orientación del USV se describen con respecto al marco de referencia de inercia.

2.2. Cinemática

La cinemática estudia el movimiento de los cuerpos en cuanto a las variables de trayectoria y tiempo sin importar las causas que originan el movimiento. Las magnitudes de interés son, la posición, la velocidad y la aceleración.

La primera derivada del vector de posición η_1 está relacionada con el vector de velocidad lineal v_1 mediante la siguiente transformación [24]:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) v_1 \quad (2.7)$$

donde $J_1(\eta_2)$ es una matriz de transformación, que se relaciona a través de las funciones de los ángulos de Euler. La matriz $J_1(\eta_2)$ es globalmente invertible. Y la primera derivada del vector de ángulo de Euler η_2 está relacionada con el vector de velocidad fija del cuerpo v_2 a través de la siguiente transformación:

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2) v_2 \quad (2.8)$$

La matriz de transformación $J_2(\eta_2)$ es singular en $\theta = \pm\pi$. Debido a las fuerzas de restauración metacéntricas, en la práctica, es poco probable que las embarcaciones oceánicas entren en esta condición de singularidad. Al combinar las ecuaciones 2.7 y 2.8 da como resultado la cinemática de los buques oceánicos:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\eta} = J(\eta) v \quad (2.9)$$

2.3. Cinética

Tanto la cinemática como la cinética son ramas de la dinámica, la primera trata solo los aspectos geométricos del movimiento, y la segunda el análisis de las fuerzas que causan el movimiento.

Para vehículos submarinos es deseable derivar las ecuaciones de movimiento para un origen arbitrario en un sistema de coordenadas local fijo al cuerpo para aprovechar las propiedades geométricas del vehículo. El comportamiento dinámico de un vehículo submarino se describe a través de las leyes de Newton del momento lineal y angular. Al formular las leyes de Newton en un sistema de coordenadas fijo al cuerpo, las fuerzas y momentos hidrodinámicos y cinemáticos permanecen constantes debido a los cambios en la orientación del vehículo en relación con el marco de referencia global fijo en la tierra. Cuando se derivan las ecuaciones de movimiento, se supondrá: (1) el vehículo es rígido y (2) la tierra está fija en el espacio.

Si se considera la segunda ley de Newton en términos de la conservación del momento lineal y angular se tiene:

$$\int_V \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right) \rho_A dV = \int_V \rho_A g dV + \int_S f dS \quad (2.10)$$

$$\int_V \frac{d}{dt} \left(r \times \frac{dr}{dt} \right) \rho_A dV = \int_V r \times \rho_A g dV + \int_S r \times f dS \quad (2.11)$$

A partir de las ecuaciones anteriores es posible obtener y escribir las ecuaciones no lineales para 6 grados de libertad de la siguiente forma:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v) v = \tau_{RB} \quad (2.12)$$

donde $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ es el vector de velocidad generalizado descompuesto en el marco fijo del cuerpo, $\tau_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ es el vector generalizado de fuerzas y momentos externos. Las fuerzas y momentos externos en todos los vehículos marinos se deben a fuerzas hidrodinámicas, fuerzas hidrostáticas, fuerzas debidas a los actuadores y, si se mueven en la superficie, a fuerzas inducidas por las olas, por las corrientes y por el viento. La acción de los distintos elementos se puede considerar aditiva, de modo que escribimos [24]:

$$\tau = \tau_{hid} + \tau_{hs} + \tau_{act} + \tau_{olas} + \tau_{cor} + \tau_{viento} \quad (2.13)$$

la matriz $C(v)$ tiene en cuenta las aceleraciones centrípetas y de Coriolis, y admite distintas formas de representación, una de las cuales es la de una matriz anti-simétrica

Los efectos hidrodinámicos dependen de la profundidad del agua y de la proximidad de otros objetos, no obstante, en la mayoría de los casos se suponen condiciones ideales de un fluido infinito.

La hidrodinámica difiere completamente de vehículos moviéndose a alta velocidad y vehículos maniobrando a baja velocidad o posicionados de forma dinámica.

2.3.1. Fuerzas hidrodinámicas

En hidrodinámica, generalmente se supone que las fuerzas y momentos hidrodinámicos en un cuerpo rígido pueden superponerse linealmente. Las fuerzas y momentos hidrodinámicos son fuerzas y momentos en el cuerpo cuando el cuerpo se ve obligado a oscilar con la frecuencia de excitación de las olas y no hay ondas incidentes. Estas fuerzas y momentos se pueden identificar como la suma de tres componentes:

(1) masa añadida debido a la inercia del fluido circundante, (2) potencial inducido por radiación amortiguación debido a la energía arrastrada por las ondas superficiales generadas, y (3) fuerzas de restauración debidas a las fuerzas de Arquímedes (peso y flotabilidad).

$$\tau_H = \overbrace{-M_A \dot{v} - C_A(v)v}^1 \overbrace{-D(v)v}^2 \overbrace{-g(n)}^3 \quad (2.14)$$

donde M_A se denomina matriz de inercia añadida o de masa añadida, C_A la matriz de coriolis y fuerzas centripetas hidrodinámicas, D_v es la matriz de amortiguamiento, y $g(\eta)$ es la posición y orientación que dependen de las fuerzas y momentos de restauración.

Una descripción detallada de las matrices M_A , $C_A(v)$, $D(v)$ se encuentra en [4]

2.3.2. Fuerzas y momentos de restauración

Estas fuerzas son aquellas que forzan al vehículo a tomar una posición de equilibrio sobre la superficie del agua, asumiendo que posee flotabilidad positiva (hacia arriba) y que no existen movimientos oscilatorios en la superficie. Sea ∇ el volumen desplazado por el vehículo, g la aceleración gravitacional (positiva hacia abajo) y $\rho_w a$ la densidad del agua, el peso sumergido del vehículo y la fuerza de flotabilidad, por el principio de Arquímedes son:

$$W = mg \quad (2.15)$$

$$B = \rho_w a g \nabla$$

para un cuerpo en equilibrio en un fluido $W = B$. Se denota la fuerza gravitacional f_g que actúa sobre el vehículo a través de su centro de gravedad: $r_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ y de igual manera que lo hace la fuerza de flotabilidad f_b sobre el centro de flotabilidad: $r_B = [x_B \ y_B \ z_B]^T$. Dichas fuerzas (gravitacional y flotabilidad) solo tienen componentes sobre el eje z ya que son fuerzas opuestas y de igual magnitud, aunque las coordenadas en donde residen pueden cambiar y debido a esto, provocar un momento sobre el cuerpo rígido. En la Figura 2.2 se puede observar de forma más comprensiva los centros de gravedad r_G y de flotabilidad r_B sobre las cuales se ofrecen las fuerzas gravitacionales y de flotabilidad, f_G y f_B , respectivamente. Estas fuerzas pueden ser transformadas al sistema de coordenadas del marco referencial aplicando los resultados de la Sección 2.1 a través de la matriz $J_1(\eta_2)$;

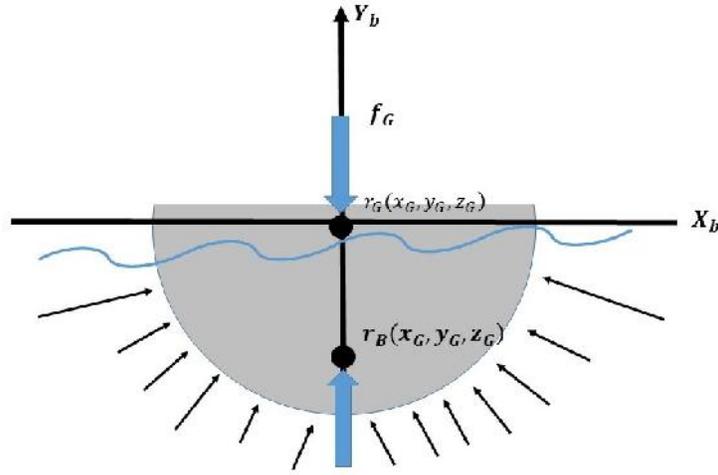


Figura 2.2: Diagrama de fuerzas de restauración y puntos de aplicación

$$f_G = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix}, \quad f_b = J_1^{-1}(\eta_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

donde $J_1(\eta_2)$ es una matriz de transformación de coordenadas definida en la Sección 2.1.

Sea $g(\eta_2)$ es el vector generalizado en el sistema de coordenadas del marco referencia que consiste en las fuerzas y momentos, gravitacionales y de flotabilidad, las fuerzas y momentos de restauración pueden ser escritos como:

$$g(\eta_2) = - \begin{bmatrix} f_g - f_b \\ r_G \times f_g - r_B \times f_b \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$g(\eta_2) = - \begin{bmatrix} (W - B)s_\theta \\ -(W - B)c_\theta s_\varphi \\ -(W - B)c_\theta c_\varphi \\ -(y_G W - y_B B)c_\theta c_\varphi + z(z_G W - z_B B)c_\theta s_\varphi \\ (z_G W - z_B B)s_\theta + (x_G W - z_B B)c_\theta c_\varphi \\ -(x_G W - x_B B)c_\theta s_\varphi - (y_G W - y_B B)s_\theta \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.3.3. Fuerzas y momentos de perturbaciones externas

El vector de fuerzas y momentos inducidos por perturbaciones ambientales, incluidas las corrientes oceánicas, las olas (generadas por el viento) y el viento se puede escribir:

$$\tau_E = \tau_E^{cu} + \tau_E^{wa} + \tau_E^{wi} \quad (2.19)$$

Las olas no tienen una frecuencia única, se puede considerar como compuesto por un conjunto de frecuencias de olas, que se describe mejor mediante procesos estocásticos. Dichos procesos se pueden aproximar como una suma finita de frecuencias, y en una aproximación lineal, la respuesta del vehículo marítimo a un estado dado de la mar se modela como la suma de las respuestas a cada una de las frecuencias [25]. Para este trabajo se usa un modelo de primer orden de onda como una perturbación. El efecto del oleaje es apreciable sobre las dinámicas de x , y y ϕ .

2.3.4. Fuerzas y momentos de propulsión

Para realizar tareas específicas se requiere de señales de control que accionen los actuadores del vehículo marino. Las fuerzas y momentos son producidas entonces por los propulsores acuáticos o el arreglo de accionamiento de propulsores acuáticos instalados en la plataforma.

Para los propósitos del trabajo desarrollado, las fuerzas de control generalizadas están dadas por [26]:

$$\tau = T(\alpha)f \in \mathbb{R}^n \quad (2.20)$$

$$f = ku \quad (2.21)$$

donde $T(\alpha) \in \mathbb{R}^{n \times r}$ es la matriz de configuración de r actuadores considerando un modelo de n grados de libertad, $\alpha \in \mathbb{R}^n$ es un vector de p ángulos azimutales, $k \in \mathbb{R}^{r \times r}$ es una matriz diagonal de coeficientes de fuerzas y $u \in \mathbb{R}^{r \times r}$ son los dos comandos de actuadores la cual depende del tipo de actuador.

Los vectores α y u son entradas de control.

El control de acimut puede derivarse de los elementos del vector de control extendido mapeando los pares (u_{1x}, u_{1y}) y (u_{2x}, u_{2y}) de acuerdo con:

$$u_1 = \sqrt{u_{1x}^2 + u_{1y}^2}, \quad \alpha_1 = \text{atan2}(u_{1y}, u_{1x}) \quad (2.22)$$

$$u_2 = \sqrt{u_{2x}^2 + u_{2y}^2}, \quad \alpha_2 = \text{atan2}(u_{2y}, u_{2x}) \quad (2.23)$$

2.4. Reducción del modelo a tres grados de libertad

El modelado para la simulación del comportamiento de los vehículos marinos y el diseño de controladores para ellos, requiere la determinación de los coeficientes que expresan las relaciones, lineales y no lineales, de las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo marino y sus actuadores, con las aceleraciones y velocidades del barco. Los modelos dependen fuertemente del tipo de vehículo y de las maniobras para las que se diseña el control [27].

La organización marítima internacional (IMO), por ejemplo, define un conjunto de maniobras para clasificar las características de maniobrabilidad de un barco (IMO, 2002). Las maniobras características son:

- *Prueba de giro en círculo.* Para giro inicial y capacidad de giro constante.
- *10/10 prueba en zig-zag.* Para la capacidad de verificación de guiñada, la capacidad de mantener el rumbo y la capacidad de giro inicial / cambio de rumbo
- *20/20 prueba en zig-zag.* Para la capacidad de control de guiñada y la capacidad de mantener el rumbo
- *Prueba de parada.* Para la capacidad de parada de emergencia
- *Prueba de extracción.* Para estabilidad inherente en línea recta.
- *Una de las pruebas en espiral.* Para estabilidad inherente en línea recta si la prueba de extracción indica que el recipiente es direccionalmente inestable

El movimiento horizontal de un barco o semisumergible puede describirse mediante los componentes de movimiento en dirección a x , y y alrededor de z , los vectores de estado se eligen como $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$ y $\eta = [x, y, \psi]^T$. Esto implica que la dinámica asociada con el movimiento en la elevación, balanceo y cabeceo se ignora, es decir $w = p = q = 0$ [5]. Para el movimiento horizontal de una embarcación, las ecuaciones cinemáticas de movimiento se reducen de la expresión general seis grados de libertad, y se tiene:

$$\dot{\eta} = J_1(n_2) v \quad (2.24)$$

$$M_1 \dot{v} = -C_1(v) v - D_1(v) v + \tau_E + \tau \quad (2.25)$$

2.5. Control del USV

En la década de 1760, James Watt construyó el primer motor de vapor que dio origen a la Primera Revolución Industrial. La Ingeniería tuvo que comenzar a lidiar seriamente con el problema de la interacción hombre-máquina y por primera vez, se vio en la creciente necesidad de desarrollar sistemas que ayudaran al hombre a controlar. Es decir, a ajustar su funcionamiento continuamente de acuerdo a sus cambiantes necesidades, y, lo que es más difícil, hacerlo de una forma que no implicara la presencia continua de una persona. Esta lucha de la Ingeniería por el control continúa hasta nuestros días. Por tanto, el primer trabajo significativo en control automático fue el regulador de velocidad centrífugo de James Watt para el control de la velocidad de una máquina de vapor [28].

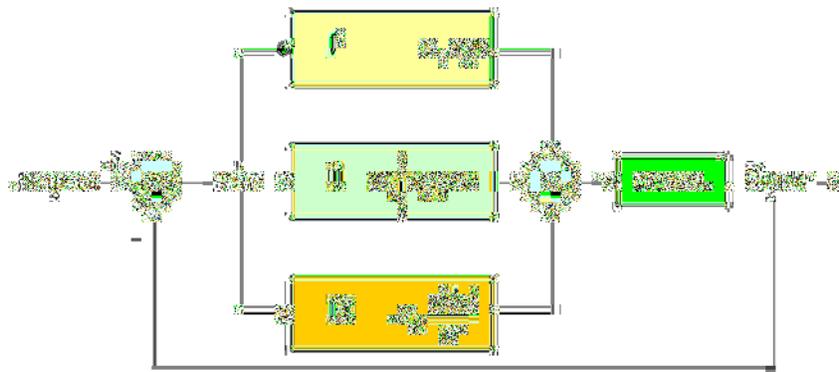


Figura 2.3: Diagrama a bloques del PID recuperado de [6]

En 1922, Nicholas Minorsky (1885-1970) trabajó en los controladores automáticos para dirigir embarcaciones, y mostró que la estabilidad puede determinarse a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. Minorsky analizó las propiedades de los controladores PD y formuló la ley de control denominada PID. Su trabajo se conoció ampliamente sólo hacia finales de los años 1930. Reconoce la no-linealidad de los sistemas y aplica la linealización mediante el desarrollo en serie de Taylor a sistemas no-lineales correspondientes al movimiento angular de un buque. Estudia la estabilidad y los efectos de los retrasos de la información sobre las salidas de los sistemas [29].

Aún con la diversidad de herramientas y métodos de control, el controlador PID es ampliamente utilizado en la industria. Este tipo de control consiste en obtener la acción de control mediante la suma de sus términos (ver Fig. 2.3): proporcional, derivativo y el integral.

2.5.1. Efectos de los términos del control PID

El control PID es un mecanismo de control que calcula la desviación y error entre el valor deseado y el valor medido de la variable de interés. El error está definido por:

$$e(t) = y_r(t) - y_m(t) \quad (2.26)$$

donde y_r es el valor deseado y y_m es el valor medido. Si se define $\mu(t)$ como la salida del controlador PID su ecuación es:

$$\mu(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.27)$$

La función principal de la acción integral es asegurarse de que la salida del proceso coincide con el punto de consigna en estado estacionario. Con control proporcional, hay normalmente un error de control en estado estacionario. Con acción integral, un pequeño error positivo conducirá siempre a una señal de control creciente, y un error negativo dará una señal de control decreciente sin tener en cuenta lo pequeño que sea el error [30].

El objetivo de la acción derivativa es mejorar la estabilidad en lazo cerrado. El mecanismo de inestabilidad se puede describir intuitivamente como sigue. A causa de la dinámica del proceso, llevará algún tiempo antes de que un cambio en la variable de control sea detectable en la salida del proceso. Así, el sistema de control tardará en corregir un error. La acción de un controlador con acción proporcional y derivativa se puede interpretar como si el control se hiciese proporcional a la salida predicha del proceso, donde la predicción se hace extrapolando el error por la tangente a la curva del error [30].

2.5.2. Características de los controladores

A continuación se presentan un resumen de cada tipo de controlador según [31].

Controlador P En ciertos tipos de procesos es posible trabajar con una ganancia elevada sin tener ningún problema de estabilidad en el controlador. Muchos procesos que poseen una constante de tiempo

dominante o son integradores puros caen en esta categoría. Una alta ganancia en un controlador P significa que el error que resulta en el estado estacionario será pequeño y no se necesitará incluir la acción integral. Por ejemplo se puede aceptar este pequeño error en el control de nivel porque con frecuencia se trabaja con un tanque de compensación donde no es importante el nivel exacto que tiene; lo que se precisa es que el nivel permanezca dentro de ciertos límites prefijados. Otro ejemplo característico es el bucle interno de un controlador en cascada; el que la variable que se ha tomado como secundaria no alcance su valor no debe preocupar excesivamente.

Controlador PD Un proceso térmico con un buen aislamiento opera de forma análoga a un integrador. Casi toda la energía que se le suministra se emplea en elevar la temperatura del horno ya que las pérdidas son despreciables. Con esta clase de procesos es posible trabajar con ganancias elevadas en el controlador sin que sea necesario introducir la acción integral. Almacenan energía térmica en lugar de masa como en un control de nivel. Sin embargo, los procesos térmicos además de actuar como un integrador a menudo tienen otra dinámica difícil que surge del transporte de calor dentro de la materia. Esto significa que solo en muy raras ocasiones es suficiente con un controlador P y que hay que complementarlo con la acción derivativa. Esta parte derivativa es la que permite parar a tiempo la entrada de energía. En algunos procesos térmicos se requiere también la segunda derivada. Esto se traduce en que no solamente se están analizando los cambios en la temperatura a través de la acción derivativa sino también su aceleración.

El controlador PD es sensible al ruido ya que a altas frecuencias tiene una ganancia relativamente elevada. Una razón importante de por que los controladores PD funcionan tan bien con los procesos térmicos es porque a menudo se pueden medir las variables del proceso con bajos niveles de ruido.

Controlador PI Es la estructura más usual de controlador. La introducción de la acción integral es la forma más simple de eliminar los problemas de oscilación y error en el estado estacionario que aparecían en los controladores on-off y P respectivamente. Puede funcionar muy aceptablemente sin la acción derivativa si no se ponen especificaciones muy severas sobre la velocidad del lazo de control. Otro caso muy común es cuando el desfase que introduce el proceso es moderado (procesos con una constante de tiempo dominante o incluso integradores puros). La acción derivativa más que una mejora en esta situación es un problema ya que amplifica el ruido existente.

2.6. Ley de control del USV

La ley de control que se aplica en este trabajo es un controlador no lineal Proporcional-Derivativo similar al propuesto en [32] y también aplicado en [4]. Se define “ e ” como el error de posición medido en el marco inercial. Sea $\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$ el vector de posición y orientación deseada del vehículo en el marco inercial, entonces el vector de error está dado por:

$$e = \eta - \eta_d \quad (2.28)$$

El vector de error expresado en el marco referencia e_b se obtiene mediante la matriz de transformación $J(n_2)$:

$$e_b = J(n_2)^T e \quad (2.29)$$

y su derivada

$$\dot{e}_b = J(\dot{n}_2)^T e + J(n_2)^T \dot{e} \quad (2.30)$$

Por tanto, la ley de control PD no lineal es

$$\tau = K_p e_b + K_d \dot{e}_b = K_p (n_2)^T e + K_d \left[J(\dot{n}_2)^T e + J(n_2)^T \dot{e} \right] \quad (2.31)$$

donde K_p y K_d son matrices diagonales positivas.

Conclusión

A partir de la literatura relacionada con el tema de este trabajo, es posible determinar una ley de control, que pertenece al control clásico. En consecuencia, la ecuación 2.31 es suficiente para implementar el control al USV, “Delfin Explorador I”. Se realizó la revisión del estado del arte, encontrando diferentes plataformas experimentales. Se incluyó en la sección 2.6 el controlador PD no lineal utilizado en este trabajo.

Capítulo 3

Desarrollo de la plataforma experimental: Delfin Explorador I

En este capítulo se presenta el proceso de construcción del USV, se aborda el tema de manufactura como piedra angular en la ingeniería y en el fortalecimiento industrial. Se describe brevemente las tecnologías que permiten el proceso de construcción del prototipo USV. Para iniciar la construcción, se hace una descripción del Diseño del USV, en referencia, que está disponible en SolidWorks®. Luego, en cada avance de esta construcción se exhiben las partes construidas.

De ahí que, en el proceso de diseño sea importante plantear de manera clara el producto en relación con sus funciones y su rendimiento. Esto debido que, durante el proceso de manufactura, los dibujos a detalle se revisan y, se seleccionan los procesos para una producción eficiente [33].

La prueba estructural del USV y de sus partes, se realiza de forma experimental.

3.1. Diseño y manufactura de un producto

Todas las actividades que realizamos se pueden agrupar en tres sectores económicas. El sector primario, se refiere a la recolección y la extracción de los recursos naturales, sin manipulación. El sector secundario, todas aquellas actividades industriales, tiene como objetivo la transformación de las materias primas que aporta el sector primario. Finalmente, el sector terciario se encarga de distribuir los bienes generados en el sector primario y secundario.

Antes de continuar, vale la pena revisar el término involucrado en esta sección, según la definición del diccionario de la Real Academia Española.

manufactura Del b. lat. *manu factura*.

1. f. Obra hecha a mano o con auxilio de máquina
2. f. Lugar donde se fabrica una manufactura.

La palabra manufactura apareció por primera vez en 1567, y la palabra manufacturar en 1683. En el sentido moderno, la manufactura involucra la fabricación de productos a partir de materias primas mediante varios procesos. La manufactura es la columna vertebral de cualquier nación industrializada [33]. De ahí que las manufacturas se incluyen en el sector secundario.

La manufactura, en su sentido más amplio es el de convertir la materia prima en productos. Incluye (1) el diseño del producto, (2) la selección de la materia prima y (3) la secuencia de procesos a través de los cuales será manufacturado el producto. El diagrama muestra varios pasos involucrados en el diseño y manufactura de un producto, este depende de la complejidad tanto de producto, como del proceso (Fig. 3.1).

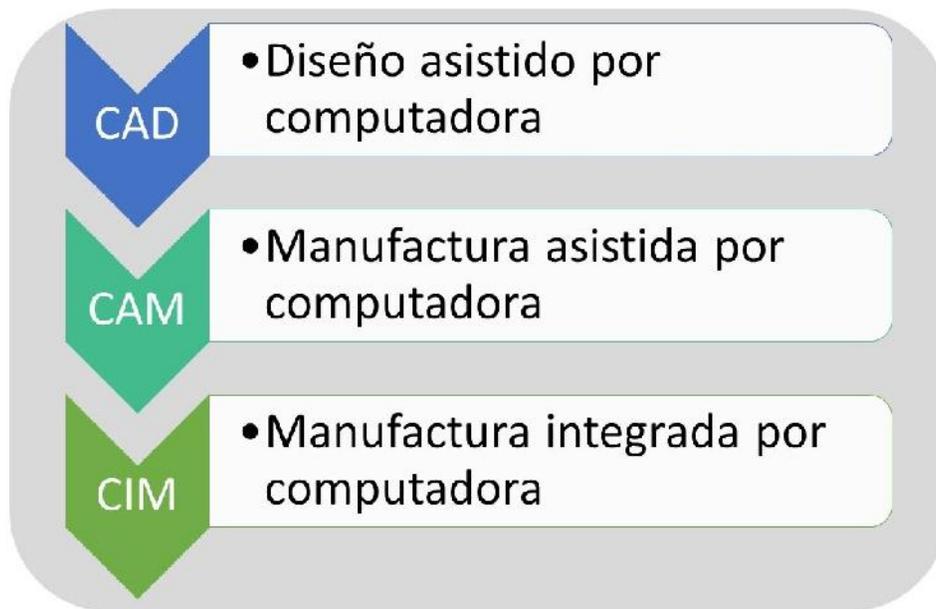


Figura 3.1: Proceso de manufactura complejo

CAD Computer-Aided Design, Diseño Asistido por Computadora, El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto a un antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño. Con esto, se puede cubrir la elaboración de cuadros sinópticos, diagramas de diversos tipos, gráficos estadísticos, representación

normalizada de piezas para su diseño y fabricación, representación tridimensional de modelos dinámicos en multimedia, análisis por el método del elemento finito, aplicaciones en realidad virtual, robótica, etc. [34]. La representación tridimensional del modelo permite detallar y documentar el diseño, por tanto es una alternativa que reduce los tiempos en el proceso de la construcción de prototipos. La pieza que se pretenda elaborar se diseña en la computadora mediante programas especializados que tiene herramientas de dibujo y modelado sólido. Posteriormente, si se requiere la impresión en 3D, se archiva en formato STL (STereo Lithography) que discrimina información de propiedades físicas de la pieza.

CAM Computer-Aided Manufacturing, Manufactura Asistida por Computadora. Trata del uso de los sistemas computacionales aplicados en todas las fases de manufactura de un producto, planificación del proceso, producción y control de calidad. En la aplicación, se tienen dos categorías (1) Interfaz directa, en las que la computadora queda conectada al proceso de producción (2) Interfaz indirecta, solo auxilia en la producción. Los sistemas CAM se basan en un conjunto de códigos para controlar las tareas de fabricación. Mediante estos códigos se generan de forma automática las rutas de corte de la herramienta para fabricar la pieza deseada.

CIM Computer Integrated Manufacturing, Manufactura Integrada por Computadora. Es una extensión lógica en la cual todas las acciones se llevan a cabo con referencia a una base de datos común. La administración de la base de datos es una tarea compleja pero no insuperable. Los dibujos y modelos por computadora sólo sirven para visualizar la geometría de las partes; no se permiten cambios en ellos. Si se van a hacer cambios en el diseño, proceso, programación, lista de materiales, normas de calidad, etc., se realizan en la base de datos; de esta forma se reflejan en toda la organización. La base de datos se actualiza continuamente con la información más reciente sobre la producción, ventas, etc. Para muchas industrias, la manufactura integrada por computadora (CIM) aún está en el futuro, pero ya ha comenzado [35].

3.1.1. Impresión 3-D

La impresión 3D o fabricación aditiva (AM) es un proceso de fabricación de piezas través de añadir capa por capa los materiales.

Desde la aparición de la primera impresora de bajo coste como la Darwin (Fig. 3.3) hasta nuestros días la impresión 3-D, se ha convertido en el proceso preferido cuando se desean obtener modelos en tiempos

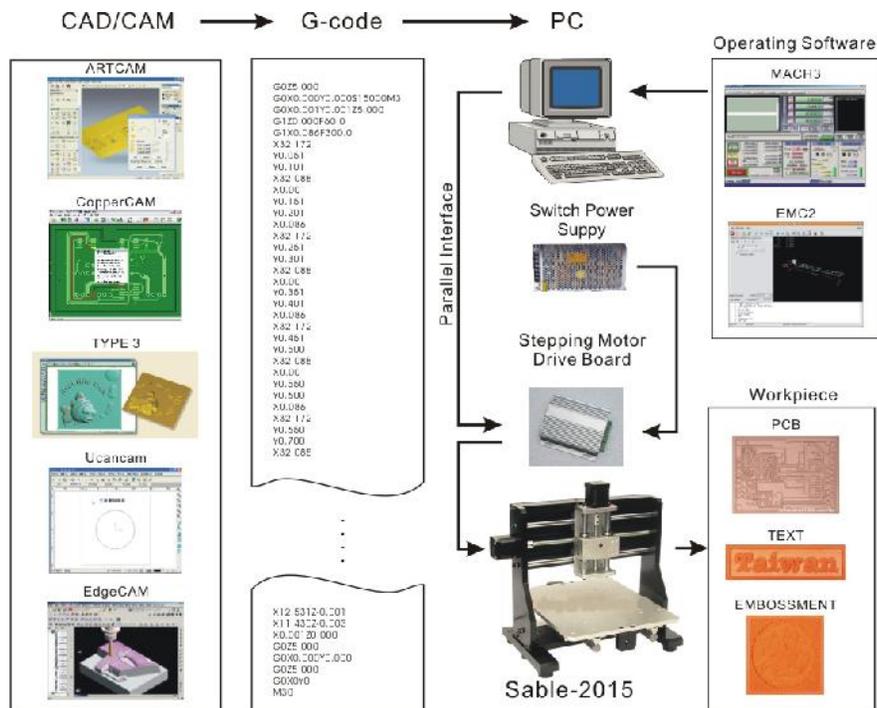


Figura 3.2: Proceso de manufactura, recuperado de [7]

reducidos en comparación con otros procesos de no solo en el ambiente industrial sino al interior del uso doméstico. La impresión 3-D hace posible la obtención física de piezas con geometrías complejas.

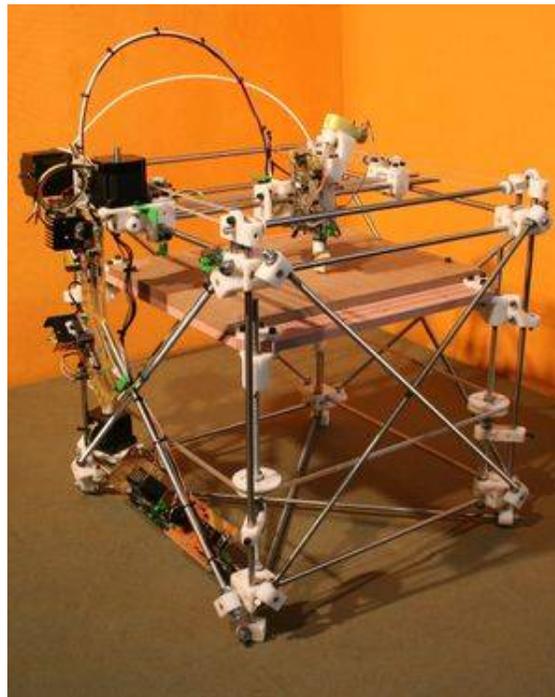


Figura 3.3: Impresora Darwin, recuperado de [8]

Este tipo de impresora ha ganado terreno debido a que no se requieren herramientas especializadas en la fabricación de las piezas. Mediante la adición de capas la impresora es capaz de agregar materiales como plástico, resina, metal, papel entre otros.

La impresión 3-D siempre inicia con un modelo creado en CAD y, es convertido a otro formato, STL por ejemplo, que es interpretado por la impresora para definir los perímetros y guías del material que se deposita en capas delgadas. Dependiendo de la tecnología utilizada el material puede variar. En los siguientes párrafos se presenta un resumen de estas tecnologías y materiales según [36] :

SLS (Selective Laser Sinteting). Con esta tecnología se compacta un material consumible mediante un láser, habitualmente polvo de poliamida. El láser incide sobre una fina capa de polvo fundiendo sólo el área de la pieza sin tocar el resto del polvo, el cual sirve de sustento para la propia pieza y sus zonas en voladizo. Cuando señalamos que no toca el resto del polvo, no es totalmente exacto ya que el calor del cercano láser afecta al material que no va a compactarse.

Fotopolimerización. Consiste en un proceso químico en el que se usan resinas líquidas que se solidifican con luz ultravioleta. Se coloca el insumo líquido en un balde especial y proyectar la luz capa por capa en el patrón de cada corte transversal del objeto controlado con la ayuda de deflectores (eje x,y) que son espejos de alta precisión ubicados sobre los galvanómetros. El rayo láser recorre la superficie de resina líquida. Una vez solidificada la capa actual, el balde debe bajar para empezar a proyectar la siguiente capa.

Polyjet La impresión 3D PolyJet es similar a la impresión por inyección de tinta, pero en vez de inyectar gotas de tinta en papel, las impresoras 3D PolyJet inyectan capas de fotopolímero líquido curable en una bandeja de construcción.

ABS El acrilonitrilo butadieno estireno o ABS es un material fuerte y duradero empleado principalmente en la elaboración de piezas de tamaño mediano y grande; pudiendo tratarse de elementos huecos, así como de aquellos impresos en varias partes que posteriormente se unirán entre sí.

Laywood Se trata de un filamento fabricado a partir de fibras de madera reciclada (40 %) y un polímero de unión, que recrea un acabado con una superficie, textura y aroma similar al de la madera. Las piezas impresas con Laywood pueden ser lijadas y pintadas, pero es necesario un tiempo de espera de entre dos a cuatro horas de enfriamiento antes de darle un tratamiento a dichos objetos.



Figura 3.4: ABS resuperado de [9]

Programas usados en el proceso de impresión

Como programas de modelamiento 3D (CAD), el mercado ofrece diferentes variantes de software CAD, tanto libres como comerciales (Libres: FreeCAD, OpenScad, Blender; Comerciales: Google Sketchup, AutoCAD, Rhinoceros3D, Autodesk, etc.). Prácticamente en todos los casos hemos observado compatibilidad con los requerimientos de formato STL del código de instrucciones que utilizan las impresoras 3D comerciales. Cada uno de los diferentes softwares de diseño tiene sus fortalezas y debilidades; por lo cual, es deseable que el diseñador esté capacitado en el manejo de más de un solo software de diseño específico que le permita aprovecharlos eficientemente.

Ejemplo de Impresión en 3-D

Para el desarrollo de nuevos navíos es necesario elaborar una maqueta que sirva de referencia para la acomodación de los suministros y demás aditamentos con los que se planea equipar el barco. El problema radica en que los costos y el tiempo para la elaboración de un modelo a escala son elevados; pero mediante tecnología de impresión 3-D estos valores son reducidos considerablemente. Se trabajó en conjunto con la empresa Farallones Consultores, que facilitó una copia de los planos navales de la embarcación; y partiendo de estos, se realizó el modelo 3D en la computadora, utilizando Rhinoceros v5; después pasó a ser impreso con la impresora Felix Printers 3.0 hasta lograr el resultado final [37].

3.1.2. Control Numérico por Computadora

La tecnología de Control Numérico (NC, Numerical Control) se construyeron en los años cuarenta y cincuenta del siglo XX. En 1947, el Sr. John Parsons comenzó a experimentar en controlar el movimiento de la máquina herramienta para la producción de componentes de aeronaves.

El Control Numérico no se aplicó en la fabricación de producción hasta principios de la década de 1960. El verdadero auge se produjo en forma de CNC, alrededor del año de 1972, y una década después con la introducción de micro computadoras asequibles. La historia y el desarrollo de esta fascinante tecnología ha sido bien documentada en muchas publicaciones. En el campo de la fabricación, y particularmente en el área de trabajo del metal, la tecnología NC ha causado una especie de revolución. Incluso en los días previos a que las computadoras se convirtieran en accesorios estándar en todas las empresas y en muchos hogares, las máquinas herramientas equipadas con el sistema NC encontraron su lugar especial en los talleres de máquinas. La evolución reciente de la microelectrónica y el desarrollo informático, ha provocado cambios significativos en el sector manufacturero en general y en la industria metalúrgica en particular.

El control numérico puede definirse como una operación de máquinas herramienta por medio de instrucciones específicamente codificadas para el sistema de control de la máquina[38].

Después de la Segunda Guerra Mundial, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos otorgó varios contratos a la Corporación Parsons para desarrollar aún más las innovaciones de mecanizado de Control Numérico realizadas por su fundador John Parsons. Interesado en los experimentos que se realizan en el Laboratorio de Servomecanismos del MIT, Parsons propuso en 1949 que el MIT se convirtiera en un subcontratista del proyecto para proporcionar experiencia en control automático. El cenicero de aluminio mostrado en la Fig. 3.5 representa una revolución en la industria de la máquina herramienta. Fue producido en 1959 como parte de una demostración de una fresadora controlada por una cinta perforadora de computadora en lugar de un operador humano.

Existe una diferencia en el significado de las abreviaturas NC y CNC. El NC representa la tecnología de control numérico más antigua y original, por lo que la abreviatura CNC representa la más nueva tecnología de control numérico computarizada, una versión moderna de su pariente más antiguo. Sin embargo, en la práctica, el CNC (Computerized Numerical Control, Control Numérico Computarizado) es la abreviatura preferida. Para aclarar el uso adecuado de cada término, observe las principales diferencias entre los sistemas NC y CNC.

El sistema NC utiliza funciones lógicas fijas, aquellas que están integradas y permanentemente ca-



Figura 3.5: Cenicero de aluminio, recuperado de [10]

bleadas dentro de la unidad de control. El programador o el operador de la máquina no pueden cambiar estas funciones.

En un CNC, el programa se compone de bloques sucesivos codificados. La estructura de este bloque debe mantenerse en el orden mostrado en la Fig.3.6. Básicamente, la máquina lee instrucciones en el orden que el usuario ha dispuesto. Es recomendable que el número de bloque sea en orden creciente y de 5 en 5. Para la máquina, estos comando representan parámetros por configurar: velocidad, avance y posición de la herramienta.

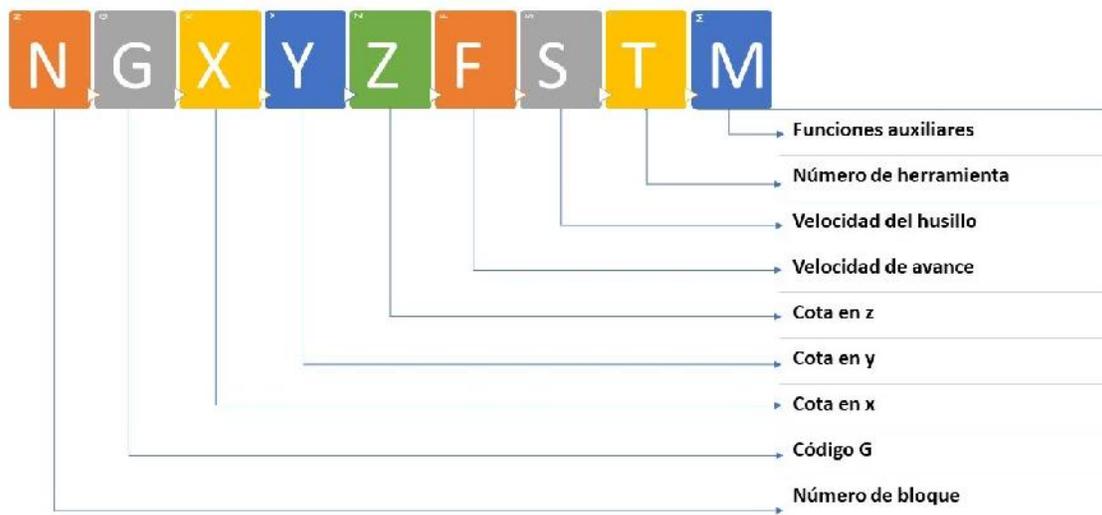


Figura 3.6: Estructura de un bloque en G

3.2. Solidworks®

Es un software CAD para el diseño mecánico 3D, desarrollado actualmente por Dassault Systemes (Suresnes, Francia) a través de su filial SolidWorks Corp. El programa basa su potencial en el modelador paramétrico de sólidos que utiliza el kernel Parasolid. Su primera versión apareció en el año 1995 (SolidWorks 95). Es un programa que permite realizar el proceso completo de diseño mecánico, desde la concepción de la idea por el diseñador a la realización de los planos técnicos necesarios para su fabricación. Mediante la interfaz del programa y sus herramientas de diseño de Pieza, Ensamblajes y Dibujo, el operador puede modelar en tres dimensiones la pieza y realizar las vistas necesarias para la concepción de planos.

3.2.1. Conceptos básicos

A continuación se presenta una lista con los conceptos básicos:

- Un modelo de SOLIDWORKS se compone de geometría sólida 3D en un documento de pieza o ensamblaje.
- Los dibujos se crean a partir de modelos, o dibujando vistas en un documento de dibujo.
- Generalmente, se empieza con un croquis, se crea una operación base y, a continuación, se agregan más operaciones al modelo. (También se puede empezar con una superficie importada o una geometría sólida).
- Puede definir su diseño agregando, editando o reorganizando las operaciones.
- La relación de asociación entre las piezas, ensamblajes y dibujos garantiza que los cambios realizados en un documento o una vista se realizaran automáticamente en el resto de documentos y vistas.
- Puede generar dibujos o ensamblajes en cualquier momento durante el proceso de diseño.
- Si tiene instalada una tarjeta de gráficos compatible con RealView, puede mostrar modelos y entornos con realismo fotográfico.
- Haga clic en Herramientas >Opciones en el menú principal para visualizar las Opciones de sistema y las Propiedades de documento

- El software SOLIDWORKS guarda su trabajo con recuperación automática. También puede seleccionar que se le haga recordar que guarde su trabajo

Asociatividad

Permite trabajar con tres módulos: Pieza, Ensamblaje y Dibujo. Cada uno de ellos genera un fichero con distinta extensión. Los documentos, aunque no pueda observarse, están asociados y vinculados entre ellos.



Figura 3.7: Módulos existentes en SolidWorks®

Para realizar un conjunto o ensamblaje debe diseñar cada una de las piezas que lo conforman y guardar como ficheros de pieza distintos. El módulo de ensamblaje permite insertar cada una de las piezas y asignar relaciones geométricas de posición para definir tridimensionalmente el ensamblaje. Finalmente, se puede obtener los planos las piezas o del propio ensamblaje de forma automática.

Módulos

Pieza El Módulo de Pieza constituye un entorno de trabajo dónde puede diseñar modelos mediante el empleo de herramientas de diseño de operaciones ágiles e intuitivas. Su facilidad de uso se debe al empleo de un entorno basado en Microsoft Windows® y en el uso de funciones clásicas como arrastrar y colocar, cortar y pegar o marcar y hacer clic con el ratón. El conjunto de funciones e iconos permiten crear modelos tridimensionales (3D) partiendo de geometrías de croquis (2D) y obtener sólidos, superficies, estructuras metálicas, piezas de chapa.

Ensamblaje El Módulo de Ensamblaje esta formado por un entorno de trabajo preparado para crear conjuntos o ensamblajes mediante la inserción de los modelos 3D creados en el Módulo de Pieza. Los

ensamblajes se definen por el establecimiento de relaciones geométricas entre las piezas integrantes. La creación de ensamblajes permite analizar las posibles interferencias o choques entre los componentes móviles insertados así como simular el conjunto mediante motores lineales, rotativos, resortes y gravedad y evaluar la correcta cinemática del conjunto.

Dibujo Es el tercer módulo integrado en SolidWorks® que permite crear planos con las vistas de los modelos o ensamblajes de forma automática y en muy poco tiempo. La obtención de las vistas, alzado, planta y perfil requiere únicamente pulsar sobre un icono o arrastrar la pieza 3D desde su ventana hasta la ventana del dibujo.

Herramientas de Colaboración

Las herramientas de colaboración las forman el eDrawings®, PhotoWorks®, SolidWorks Animator®, SolidWorks Viewer® y el 3D Instant Website®. Todas estas aplicaciones permiten compartir y comunicar la información de diseño con terceros a través de Internet [39].

Herramientas de Productividad

Las herramientas de productividad permiten reducir el tiempo de diseño e incluyen soluciones como: DWGEditor, SolidWorks Toolbox, Solid Utilities, SolidWorks Design Checker, FeatureWorks, SolidWorks Task Schedule, SolidWorks Routing, Scan to 3D y Rhino to SolidWorks Add-in, entre otras.

3.2.2. Gestor de diseño

También es conocido como árbol de operaciones o FeatureManager. En él se incluyen de forma histórica todas las operaciones que han sido necesarias efectuar para conformar la pieza durante su diseño. Las operaciones recientes se encuentran al final del árbol mientras que las más antiguas son las primeras en aparecer.

3.2.3. Exportación de archivos de impresión en 3D

Puede exportar archivos de pieza y ensamblaje a formato STL o formato de archivo de fabricación aditiva .amf. Aquí solo menciona en forma resumida este procedimiento para exportar un archivo de impresión 3D.

3.2.4. Generación de archivo para CNC

Una de las alternativas que propone SolidWorks®, para el proceso de manufactura mediante CNC es SOLIDWORKS CAM. Éste, es un complemento para todas las versiones de SOLIDWORKS CAD que le permite preparar diseños para evaluar las posibilidades de fabricación en las primeras fases del ciclo de desarrollo. Las tareas de fabricación que tenían que esperar hasta que se hubiera completado un diseño ahora se pueden llevar a cabo paralelamente con el proceso de diseño.

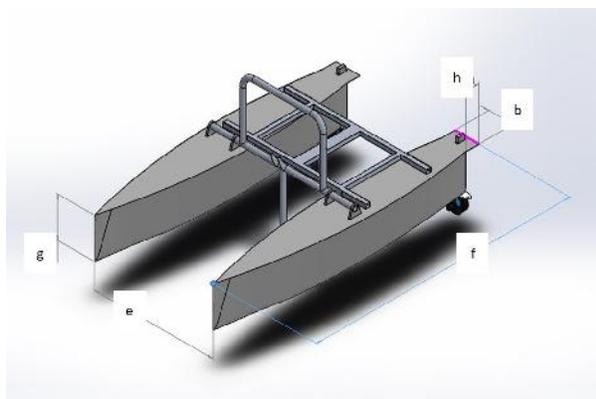
3.3. Diseño del Delfin Explorador I

El modelo en CAD elaborado se muestra en la Figura 5.2. Como se mencionó anteriormente, el diseño más adecuado y estable es el de tipo catamarán, el cual usó dos cascos que se encuentran unidos mediante una estructura rígida.

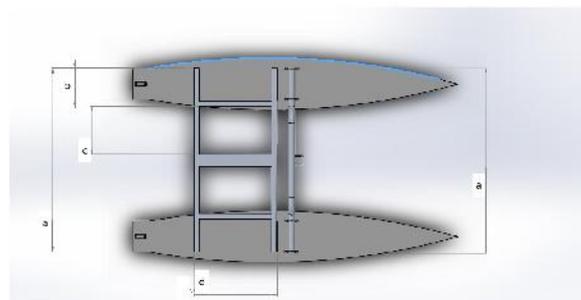
Las medidas de la plataforma se describen en la Tabla 3.1 mientras que en las Figuras 5.2-3.9 muestran diferentes vistas del modelo tridimensional.

El barco tiene una estructura adicional destinado para colocar sensores que puedan sumergirse. algunos de estos sensores pueden ser ecosondas, sensores de salinidad, etc. En las vistas frontal y posterior se puede ver la espiga que alcanza una profundidad mayor que el nivel de los propulsores.

En la popa se dejan dos prolongaciones delgadas a nivel de cubierta. Sobre estas prolongaciones se empotran los servomotores que hacen posible el cambio de azimut de los propulsores.

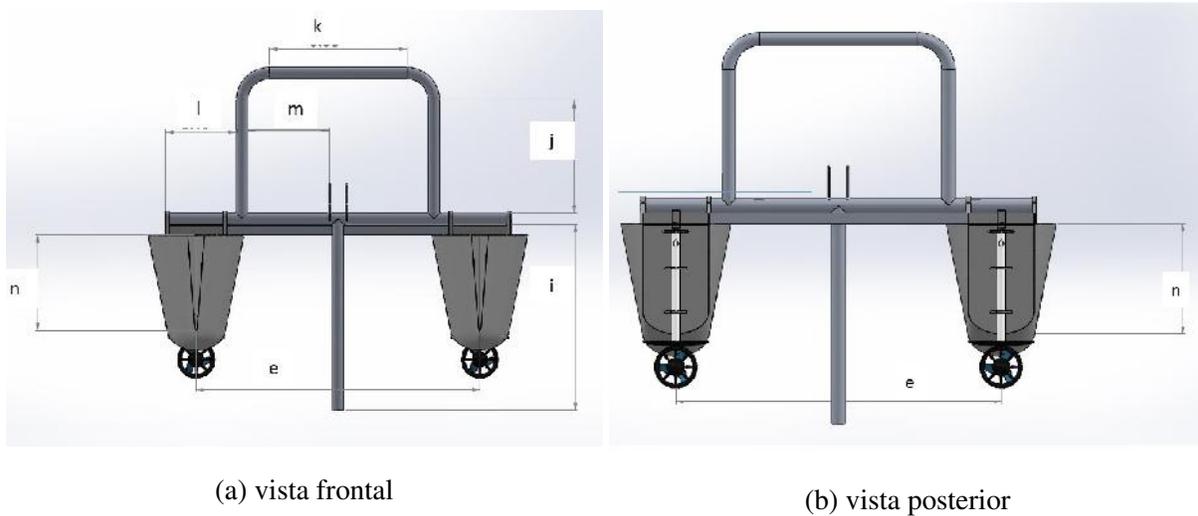


(a) Vista isométrica



(b) Vista superior

Figura 3.8: Delfin I



(a) vista frontal

(b) vista posterior

Figura 3.9: Delfin I y sus vistas

Tabla 3.1: Resumen de dimensiones en metros

Parte	valor	Parte	valor
a	0.89	h	0.08
b	0.15	i	0.49
c	0.23	j	0.30
d	0.40	k	0.19
e	0.74	l	0.21
f	1.58	m	0.25
g	0.25	-	-

El diseño de la base central es con perfil tubular rectangular (PTR), como se muestra en Fig. 3.9a.

En el codaste están empotrados dos pares de chumaceras. En las chumaceras gira un eje que transmite el torque de los servomotores al soporte de montaje de los propulsores (Fig. 3.9b).

3.4. Construcción del prototipo

3.4.1. Elaboración de soportes y chumaceras en polietileno

En el diseño de referencia el USV, “Delfin Explorador I” se presenta como un todo; no contiene especificaciones de tornillería ni sujeción de sus partes. Sin embargo, dada la necesidad de transporte del

barco durante la etapa de experimentación, se considera que el prototipo fuera desarmable. Y se procede al diseño en SolidWorks® (Fig. 3.10a) tanto de los soportes como chumaceras, para sujeción.

Para llevar a cabo el corte de las piezas se usa una máquina fresadora CNC Sable-2015 (Fig.3.10b)

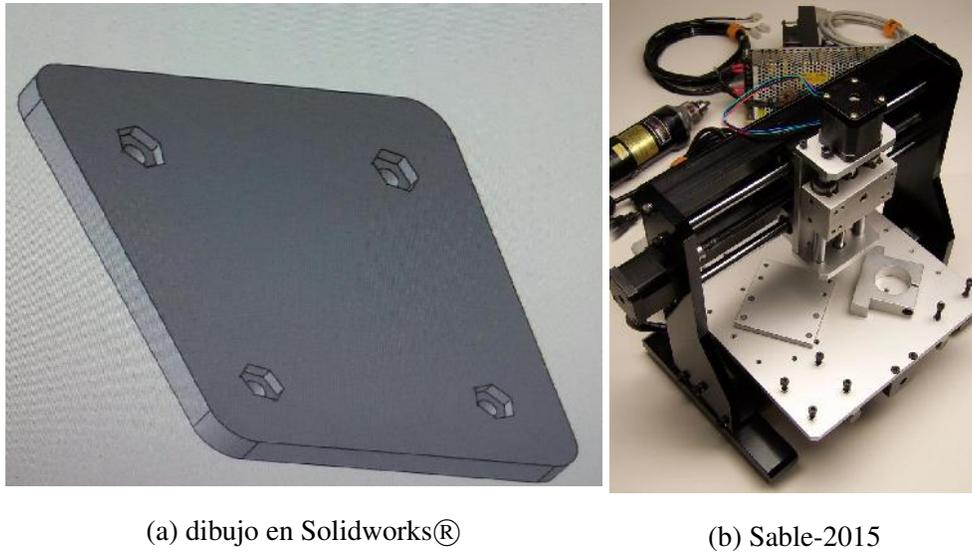


Figura 3.10: Diseño de los soportes y Fresadora CNC, recuperado de [7]

Mediante el uso de una máquina fresadora CNC se cortan estas piezas en polietileno, este material se elige por su alta resistencia al impacto y la compresión mecánica(Fig. 3.11a).

La función principal de estos soportes es servir de unión entre los cascos (Fig. 3.11b).

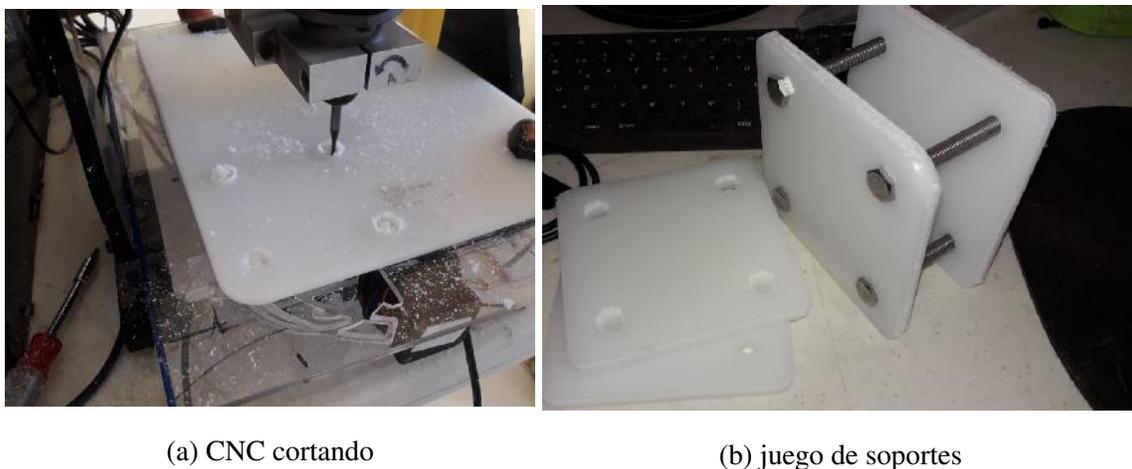


Figura 3.11: Proceso de corte del juego de soportes

Las chumaceras sugeridas en el diseño del “Delfin Explorador I” se cortan (Fig. 3.12a) también en polietileno. Esto debido a su propiedades mecánicas de bajo coeficiente de fricción, lo que garantiza un

correcto giro de los ejes, tanto del mecanismo de inmersión de los sensores de batimetría como de los ejes azimutales de los propulsores (Fig 3.12b).



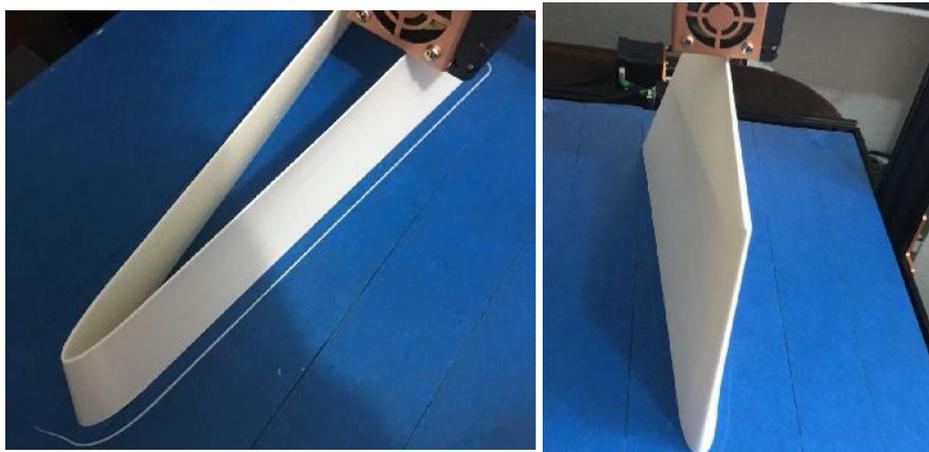
(a) corte con CNC

(b) juego de chumaceras

Figura 3.12: Proceso de corte de juego de chumaceras

3.4.2. Elaboración de los cascos en 3-D

El proceso de elaboración de los cascos inicia con la *impresión 3D* de los cascos del Catamarán Fig. 3.13a. Se fabrica un solo casco del catamarán usando el filamento PLA (Ácido Poliláctico) que es un polímero biodegradable derivado del maíz o del trigo. Actualmente, se emplea en la industria textil, es resistente a la humedad y a la grasa. Sin embargo, no se recomienda la impresión de objetos que estén destinados a resistir altas temperaturas. La temperatura de procesamiento se encuentra entre 60 y 125°C.



(a) sección en impresión

(b) sección completada

Figura 3.13: Impresión de la popa del USV

Debido a sus dimensiones el casco se secciona y se imprimen las secciones y posteriormente se unen. En la Figura 3.13 se puede apreciar dos secciones en proceso de manufactura.

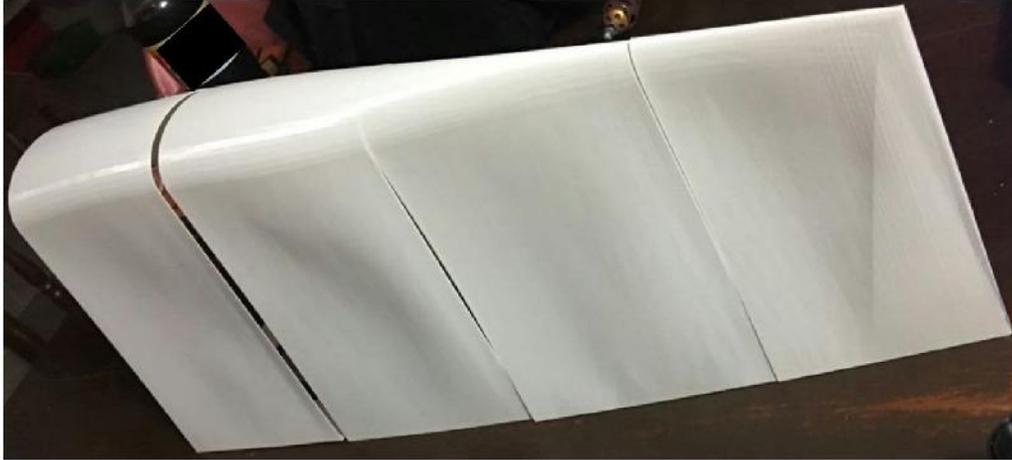


Figura 3.14: Impresión por secciones

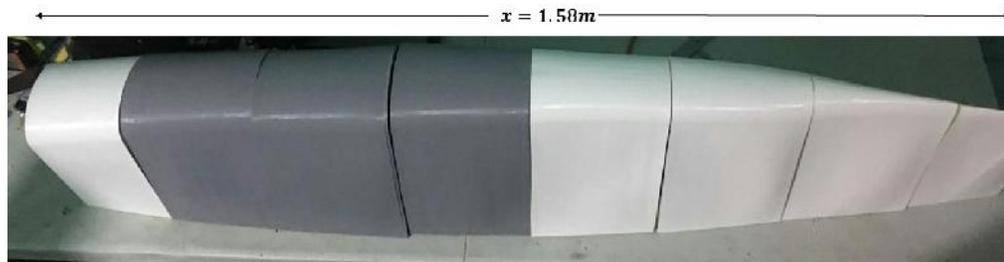


Figura 3.15: Impresión de total de las secciones

Esta versión del casco (Fig. 3.15) si se coloca en agua, no es capaz de mantenerse a flote debido a que el material presenta filtraciones.

Con base a estas impresiones se procede a elaborar el molde.

3.4.3. Elaboración del Molde

A partir de la *impresión 3D*, se recurre a la fabricación del molde en concreto como se muestra en la Fig. 3.16. El casco impreso en 3D no es posible reutilizarlo, parte de él queda adherido a la superficie interna del molde de concreto.



Figura 3.16: Molde de concreto

3.4.4. Elaboración de la base central

La denominada base central se elabora con Perfil Tubular Rectangular (PTR). Este elemento del USV permite la unión de los dos cascos. Se adapta a cada uno de los cascos usando los soportes de polietileno, de tal forma que sea posible desmontarla retirando ocho tuercas (Fig. 3.17).



Figura 3.17: Base central

3.4.5. Elaboración de los cascos en fibra de vidrio

Primero, es necesario cubrir el molde hecho en concreto con una capa de cera. Después, de forma sucesiva se colocan capas de fibra de vidrio al interior del molde. Se prepara una mezcla de Resina y

acelerador y se aplica sobre las capas de fibra de vidrio. Y se observa, durante unos minutos, una fuerte reacción térmica. Una vez solidificada la resina, el siguiente paso es retirar la pieza de fibra de vidrio.

La cubierta de cada uno de los cascos se elabora también de fibra de vidrio. Los soportes de polietileno se instalan en las cubiertas. Finalmente, se unen también con fibra de vidrio las cubiertas y los cascos.



(a) molde

(b) casco



(c) Pintura de los cascos

Figura 3.18: Molde-concreto y Casco-fibra de vidrio

Ambos cascos se pintan en color azul. La pintura se prepara usando la resina.

3.4.6. Construcción del Mecanismo para instrumentos de batimetría

Para descender los instrumentos de batimetría se construye un mecanismo con tubo tubos de pvc. Las chumaceras son de polietileno con la finalidad de reducir el coeficiente de fricción. El mecanismo opera mediante un actuador lineal como se muestra en la Figura 3.19.



Figura 3.19: Mecanismo para instrumentos

3.4.7. Montaje de soporte de Propulsores

En la popa se montan los propulsores (Fig.3.20). Para ello se usan las chumaceras y un par de soportes de polietileno. Los ejes se construyen con tubo pvc cédula cuarenta, esto debido a su alta resistencia química, sin oxidación o corrosión.



Figura 3.20: Montaje de los propulsores

3.5. Prototipo Delfin I

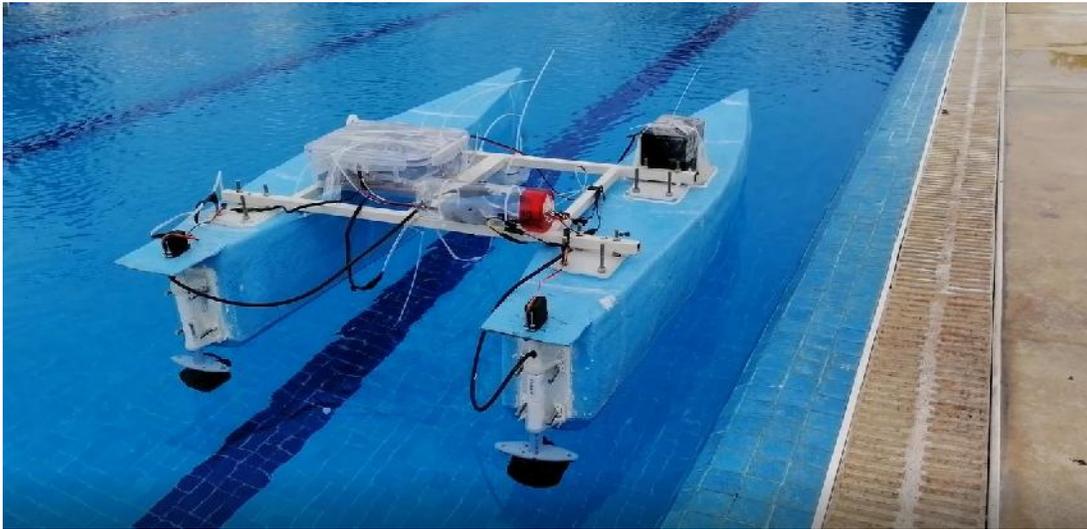


Figura 3.21: Delfin I. Se muestran los actuadores

Conclusión

Las pruebas de flotación indican que la embarcación tipo catamarán se construyen con los materiales apropiados, los cascos no presentan filtraciones al sumergir en agua al USV, sin los dispositivos electrónicos. Los propulsores se ubican a poca profundidad de la línea de flotación por lo que este USV que se construye es una opción viable para el monitoreo en zonas de baja profundidad.

Asimismo, el mecanismo de inmersión de instrumentos de batimetría mantiene una correcta operación al poder girar en las chumaceras.

Capítulo 4

Sistema electrónico embarcado

En este capítulo se aborda el sistema electrónico que hace posible el funcionamiento del USV. En términos generales el prototipo alberga dos sensores, cuatro actuadores y una unidad central de proceso. La propuesta inicia con la elección como centro de procesamiento una tarjeta Raspberry Pi. Esta tarjeta es idónea para este trabajo debido a sus características electrónicas y su capacidad de procesamiento. La integración de los sensores y actuadores se realiza de manera óptima en un ambiente de programación Python.

4.1. Diagrama a bloques del sistema embarcado

El vehículo experimental cuenta con sensores para obtener en tiempo real el vector de estado $\eta = [x, y, \psi]$. Para obtener las variables de posición se usó un módulo GPS mientras que para la variable de orientación se utilizó una IMU. Ambas variables son leídas por la unidad de procesamiento.

El vehículo comandado mediante dos pares de actuadores azimutales; es decir un servo y un propulsor. Estos actuadores requieren del vector $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2]^T$ y $u = [u_1, u_2]^T$ que son el ángulos de azimut y la fuerza del propulsor, respectivamente.

Con la finalidad de establecer comunicación constante con el vehículo experimental y el operador se requiere disponer apropiadamente de una red local para poder monitorear el comportamiento del USV.

La Fig. 4.1 muestra un diagrama de bloques con todos los elementos descritos. La unidad de procesamiento, los sensores y los actuadores se encuentran instalados en la plataforma. A partir de este diagrama pueden identificarse los siguientes subsistemas embarcados: a)subsistema de posición, b)subsistema de orientación, c)subsistema de procesamiento y d) subsistema de actuadores.

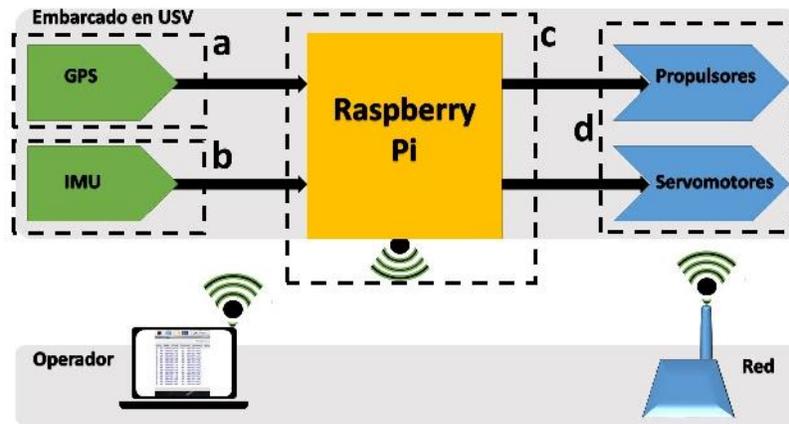


Figura 4.1: Diagrama a bloques del sistema electrónico del USV

4.2. Subsistema de procesamiento

Raspberry Pi es un ordenador de placa reducida de bajo costo, desarrollado en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación en las escuelas.

En el presente trabajo se hace uso de Raspberry Pi 3 modelo B, esta se lanzó en el año 2016, renueva procesador, una vez más de la compañía Broadcom, Quad-Core, pero cambia de 900MHz a 1.20GHz. Mantiene la RAM en 1GB. Su mayor novedad fue la inclusión de Wi-Fi y Bluetooth (4.1 Low Energy) sin necesidad de adaptadores. Posee un puerto HDMI (High Definition Multimedia Interface), que proporciona video en alta resolución y audio digital (Fig. 4.2).



Figura 4.2: Raspberry Pi 3 B recuperado de [11]

Cuenta con sistemas operativos GNU/Linux como Raspbian aunque se disponen de otros sistemas operativos optimizados para el hardware de la Raspberry Pi. La instalación de Raspbian se realiza me-

diante la instalación de la imagen del sistema operativo en una tarjeta Micro SD. Se recomienda una de 8 Gb de memoria como mínimo. En la página oficial de Raspberry se puede encontrar todo sobre la instalación del sistema operativo. La versión usada en este trabajo es Debian 9.

4.2.1. Configuración de la Raspberry PI 3 B

Se puede trabajar de dos maneras, ya sea conectando por medio de un cable de video o un cable hdmi a un televisor o smartv, teclado y ratón a la Raspberry o conectándose por medio de la red con una terminal de consola usando algún protocolo. En las versiones recientes de Raspbian el proceso de configuración de Raspberry Pi se ha simplificado mucho, se tiene una ventana de configuración con todas las opciones disponibles.

Desde el menú de inicio, se pueden activar distintas funciones de la Raspberry Pi como el acceso remoto mediante Secure SHell (SSH) o Virtual Network Computing (VNC). VNC permite conectar de forma segura dos computadoras en una red pública como si fuera una red privada.

4.2.2. Lenguaje de programación

Al instalar la distribución GNU/Linux, en la Raspberry Pi queda instalado por defecto la versión de Python 3 (IDLE). PythonTM es un lenguaje de programación creado por Guido van Rossum con, programador holandés. Tiene las siguientes características, interpretado, multiplataforma, multiparadigma, tipado dinámico y gratuito. Con este lenguaje no es necesario compilar el código para su ejecución, ya que existe un intérprete que se encarga de leer el fichero fuente y ejecutarlo.

En el desarrollo de este trabajo se usó la versión 3.6 de Python. La serie 3.x tiene diferencias importantes con las versiones inferiores por lo que en caso de migrar las versiones tendrán que tomar en cuenta las diferencias.

En la sintaxis de Python se hace uso de la indentación. Las funciones en Python no tienen llaves para indicar el principio y fin de un código y no se encuentran las palabras *begin* o *end*. Los niveles de indentación se utilizan para señalar que las sentencias corresponden a un bloque y el cambio en el nivel de indentación se usa para indicar el final. Las sentencias no requieren de un punto y coma al final, como sucede en otros programas.

La instalación de Python conlleva funcionalidades portátiles conocida como la biblioteca estándar. Con esta biblioteca es posible realizar una variedad de programas. De acuerdo con el sitio oficial de

Python, la biblioteca estándar es muy extensa y ofrece cobertura básica de aplicaciones: Cadenas, criptografía, estructura de datos, funciones numéricas y matemáticas, compresión de datos, etc.

Python puede expandirse mediante un colección de software soporte. El Toolkit Modular para Procesamiento de Datos (MDP) ha sido diseñado para usarse como marco para el desarrollo del procesamiento de datos científicos y para el procesamiento de señales digitales.

4.3. Subsistema de Posición

El módulo que se emplea en este trabajo es el GPS u-blox NEO-6M. Incluye una interfaz UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) configurable para la comunicación en serie, el rango de voltaje de operación es de 3.3 a 5 V. El algoritmo de u-blox proporciona alta precisión y es ideal en muchas aplicaciones como la topografía, cartografía, marina y agricultura.

Este GPS entrega datos de acuerdo al estandar 0183 de la National Marine Electronics Association (NMEA). Para su operación se utiliza una tarjeta Arduino con la librería TinyGPS ++, la cual es una biblioteca de Arduino específica para analizar flujos de datos tipo NMEA.

La Fig. 4.3 muestra una fotografía del GPS.

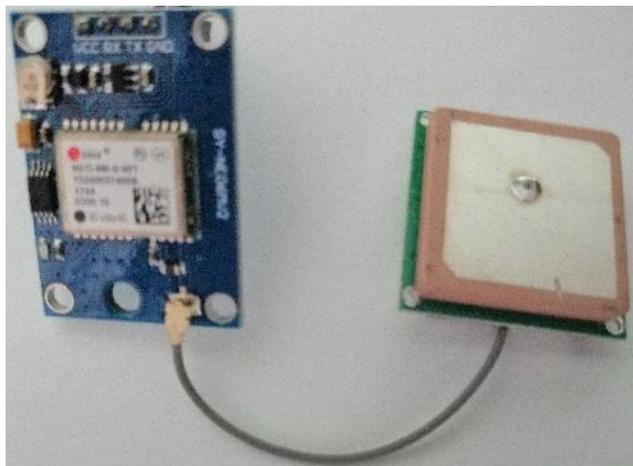


Figura 4.3: GPS de U-blox

4.4. Subsistema de Orientación

El subsistema de orientación proporciona los ángulos de Euler del vehículo. Para medir los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada se usó la unidad de medición inercial(IMU, por sus siglas en inglés) BNO055.

Este dispositivo combina acelerómetros, giroscopio y magnetómetros para la estimación de los ángulos, además las velocidades.

Dado que el modelo considerado en este trabajo es el modelo reducido de 3 grados de libertad, el subsistema de orientación proporciona el ángulo de guiñada (yaw) ψ . Es importante mencionar que el sensor es colocado en el centro de gravedad del barco donde se considera que se encuentra el sistema coordenado del cuerpo $x_b y_b z_b$.

En la Figura 4.4 se muestra el arreglo de conexiones entre el Arduino y la IMU. Una vez leído los datos por Arduino, la Raspberry recupera el valor de ψ mediante comunicación serial entre ambas tarjetas.

Tabla 4.1: Terminales de la imu

Pines	
Pines de potencia	VIN: 3.3-5.0 V
	3VO: 3.3V
	GND
I2C	SCL, SDA DE 3V a 5V
Otros pines	RST, INT, ADR , PS0 Y PS1

Adafruit proporciona una guía explícita para conectar y comunicar la imu con arduino (Fig.4.4).

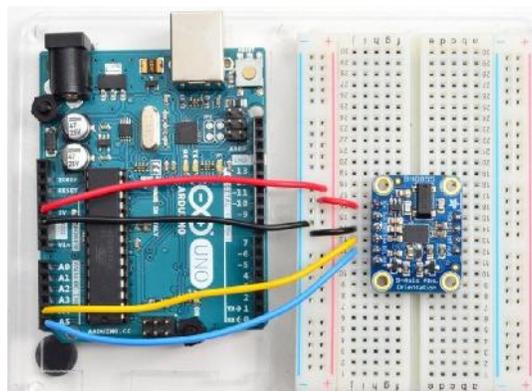


Figura 4.4: Conexión de IMU con arduino recuperado de [12]

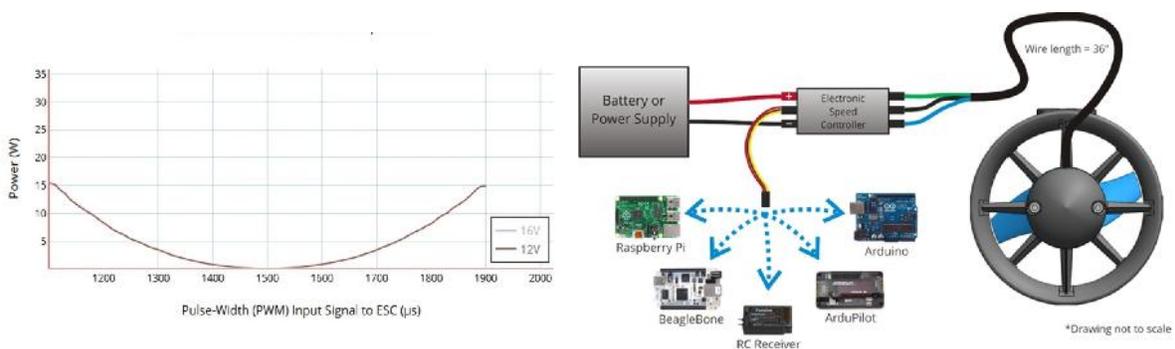
4.5. Subsistema de actuadores

Los propulsores que se emplean son de la marca bluerobotics modelo T-200. El T200 es un motor eléctrico sin escobillas. El cuerpo del propulsor y la hélice están hechos de plástico de policarbonato

resistente y los únicos componentes metálicos expuestos están hechos de acero inoxidable 316 de grado marino. Su diseño permite que el motor se enfríe con agua y que los bujes de plástico se lubriquen con agua. Elimina la necesidad de sellos de eje, acoplamientos magnéticos y compartimentos llenos de aire o aceite, lo que hace que el propulsor sea naturalmente tolerante a la presión. Está optimizado para funcionar a un voltaje de 16v, pero puede funcionar a un rango de voltajes [13].

Los servomotores encargados del azimut de los propulsores se eligieron de tipo sumergibles, de 15 kg con engranaje metálico, DS-3118MG 15KG.

La potencia de los propulsores puede controlarse mediante una señal PWM, su rango de trabajo es de 1100 a 1900 μs (Fig. 4.5a). El T-200 es compatible con Raspberry (Fig. 4.5b). La alimentación para este USV se elige en 12 voltios.



(a) potencia-pwm

(b) compatibilidad del T200

Figura 4.5: Conexión de los propulsores recuperado de [13]

Para controlar los actuadores se usó El PCA9685, según la descripción de la página web oficial de Adafruit, se trata de un controlador LED de 16 canales pero también puede ser usado para controlar servos por PWM. La placa tiene los pines en el orden correcto para conectar sin problemas los servos y, una bornera para la alimentación de los servos.

El módulo PCA9685 puede comunicarse con Raspberry Pi mediante el bus I2C (Fig. 4.6). Pero, es necesario descargar e instalar la librería como indica Adafruit. El módulo PWM funciona a una frecuencia de 24 Hz a 1526 Hz con un ciclo de trabajo que es ajustable de 0 a 100 %, la resolución PWM es de 12 bits (4096 pasos)

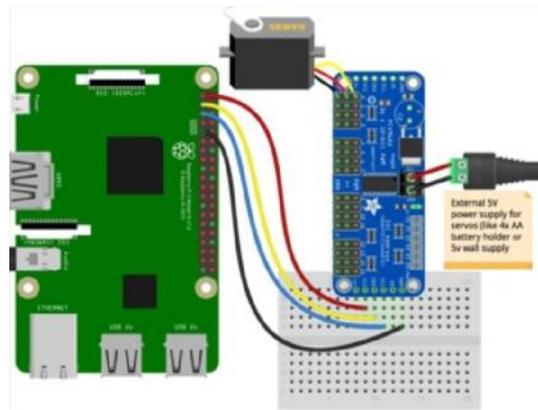


Figura 4.6: Conexión Módulo PWM a los actuadores recuperado de [12]

Como se ha indicado, tanto el GPS como la IMU se conectan a la placa arduino. La función de la placa Arduino es la de reunir en un solo paquete de datos la información proveniente de los sensores (Fig. 4.7). Por tanto, es necesario comunicar mediante comunicación serial la placa arduino con Raspberry.

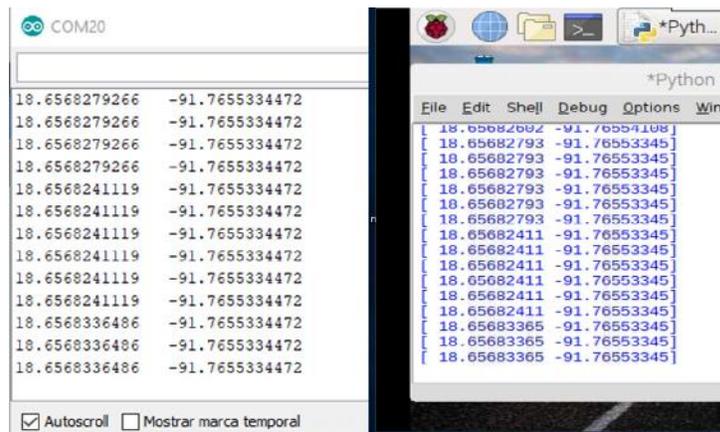


Figura 4.7: Datos del GPS en Arduino y Raspberry Pi

4.6. Resumen de los circuitos seleccionados

En la Fig. (4.8), se ilustra nuevamente en un diagrama de bloques más explícito los dispositivos que se han seleccionado, la fuente de alimentación para el sistema no se incluye, pero se recuerda que los propulsores y servomotores, son de 12v y 5v. Una vez interconectados os elementos que conforman la electrónica del USV es recomendable reunirlos en un gabinete hermético.

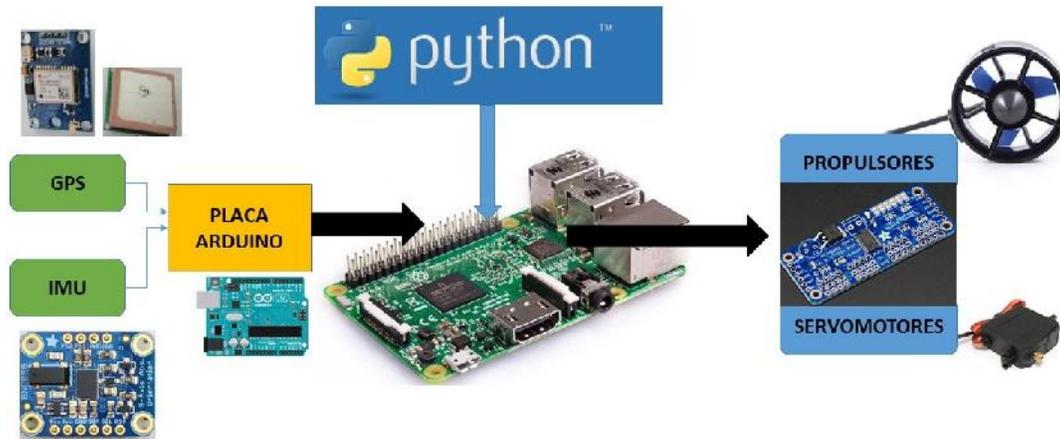


Figura 4.8: Circuitos que integran la electrónica del USV, imágenes recuperadas de [14], [15], [13], [12], [11]

La forma de interconexión de estos elementos hace uso de diferentes tecnologías. Para una mayor claridad se incluye la tabla 4.2

Tabla 4.2: Interconexiones entre dispositivos

Dispositivo	Etapa siguiente	Método de conexión/Técnica
NEO 6-M	Arduino	RS-232
BNO055	Arduino	I2C
ARDUINO	Raspberry	RS-232
RASPBERRY	PCA9685	I2C
PCA9685	Propulsores/Servomotores	PWM

Conclusión

En esta fase, las pruebas experimentales demuestran la compatibilidad entre los diferentes subsistemas. Que el suministro de potencia energético es suficiente para las tareas en un ambiente con poca perturbación. Por tanto, es posible llevar a cabo acciones de control sobre el USV construido, los movimientos de avance y giros a babor o estribor, pueden contribuir al movimiento en torno al eje z. Y es posible controlar este sistema sub-actuado mediante las señales adecuadas en los actuadores.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se exponen los resultados al probar de forma experimental el USV, “Delfin Explorador I”. Se inicia con la descripción de las pruebas de la estructura y flotabilidad de los cascos. La prueba de los sensores se lleva a cabo de forma aislada, es decir, sin interactuar con los demás componentes. Luego, se documentan los efectos de los actuadores sobre el movimiento, esta prueba incluye a los sensores. Finalmente, se llevan a cabo pruebas con la ley de control seleccionada.

Todas las pruebas se realizan en la piscina de la unidad deportiva de la Universidad Autónoma del Carmen.

5.1. Pruebas del casco

En esta fase de las pruebas experimentales se verificó que la estructura no colapsó por las presiones ejercidas por el agua. Además, la plataforma permitió sujetar el resto de los elementos que integran el USV sin presentar deformaciones (Fig. 5.1).

La flotabilidad del USV se verificó sin el peso adicional de los dispositivos electrónicos (Fig. 5.1), los cascos no presentaron filtraciones. La línea de flotación que inicia en la proa (Fig. 5.2a) y termina en la popa (Fig. 5.2b) es uno de los aspectos más importantes de las embarcaciones. En ambas partes del USV se ha anexado un par de segmentos perpendiculares, \overline{AB} y \overline{CD} , con la finalidad de que el lector pueda observar los porcentajes de *obra viva* y *obra muerta*. Se observa que la línea de flotación en la popa, ya considera el peso total de los circuitos electrónicos.

En la Tabla 5.1 se muestran los datos recolectados al situar el prototipo en la piscina universitaria.

También se verifica la baja fricción y desgaste entre el eje de pvc y las chumaceras de polietileno.

Tabla 5.1: Resultados de la prueba de flotabilidad

Dato	Valor
Peso total del catamarán	10.5 kg
Obra viva	menor al 25 %
Ubicación de los propulsores respecto de la línea de flotación	menor a 20 cm.

Adicionalmente, se situó el USV en el mar, la flotabilidad mejoró, la línea de flotación cambió en un centímetro aproximadamente.

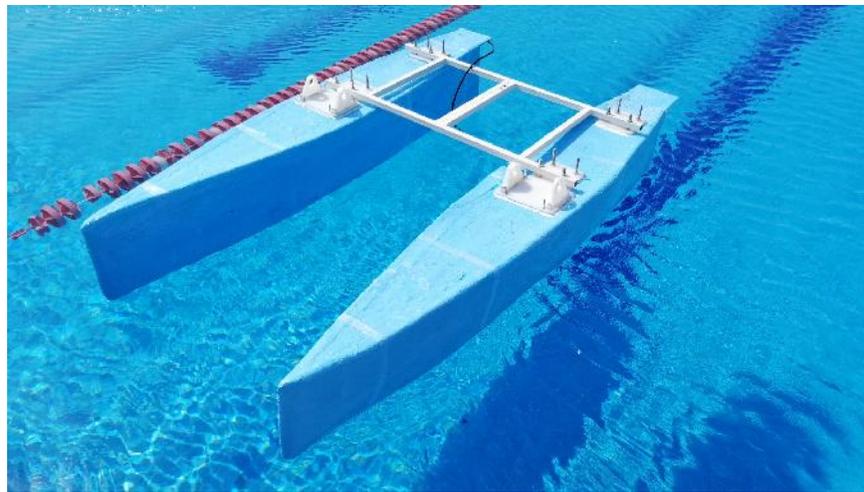


Figura 5.1: Prueba experimental de flotabilidad



(a) en la proa

(b) en la popa

Figura 5.2: Línea de flotación

5.2. Prueba del sistema electrónico embarcado

La prueba en lazo abierto del USV consistió de dos fases, la prueba experimental de sensores y, posteriormente, la prueba general del USV. Es decir, el funcionamiento completo tanto de sensores como actuadores, sin considerar el control Proporcional Derivativo.

5.2.1. Prueba experimental de sensores

Los subsistemas descritos en el Cap. 4 se reúnen en un gabinete de plástico herméticamente cerrado. La energía para todo el sistema embarcado la proporciona baterías recargables de 12 volts, separando los suministros para los actuadores y para el resto de la electrónica.

El espacio de trabajo es una piscina de dimensiones 25x30 usando una brújula y con ayuda de la propia IMU se encontró la ubicación real de la piscina de acuerdo al norte geográfico. Se consideró el lado de mayor longitud (30 metros) como el eje y mientras que el lado de menor longitud como el eje x , definiendo así el sistema coordenado del marco de referencia inercial. El eje y se encuentra orientado al norte geográfico mientras que el eje x apunta al este.

Para probar los sensores y desabilitaron los actuadores y llevo a cabo un recorrido predefinido de forma manual.

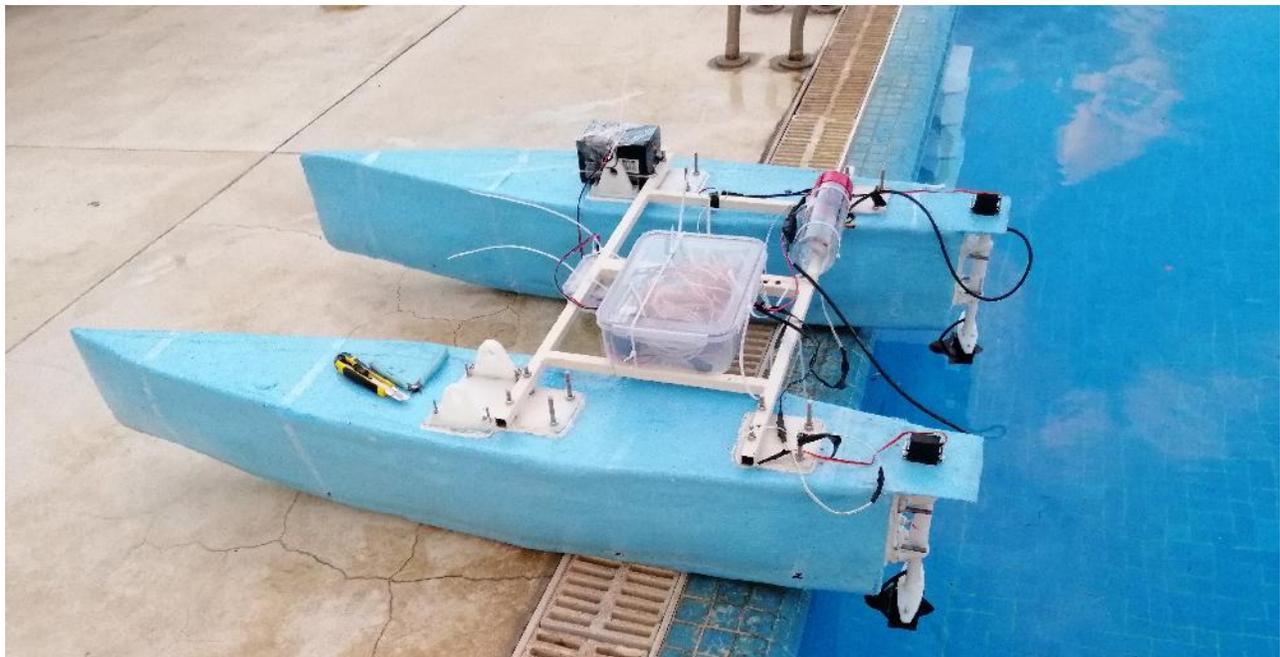


Figura 5.3: Delfin 1 integrado

Para probar los sensores se deshabilitan los actuadores y se lleva a cabo un recorrido del USV, “Delfin Explorador I” en la piscina de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR) la cual tiene una dimensión de 25x30 metros.

En la gráfica (Fig. 5.4) se muestra la trayectoria (en metros) del USV.

Los puntos en color rojo representan las esquinas del área de trabajo. Los puntos en color verde $P_1(0, 20)$, $P_2(20, 20)$ y $P_3(0, 20)$ representan las coordenadas para los experimentos subsecuentes y, sirven de referencia durante la ejecución de este recorrido, estos están unidos mediante líneas punteadas.

Por otra parte, la trayectoria del USV se construye mediante las coordenadas que envía el GPS de forma discreta, por lo que se puede notar una secuencia de puntos en color verde que inician en $(5, 0)$ hasta $(5, 28)$, las irregularidades de esta línea se debe a que el recorrido se realiza mediante la intervención humana.

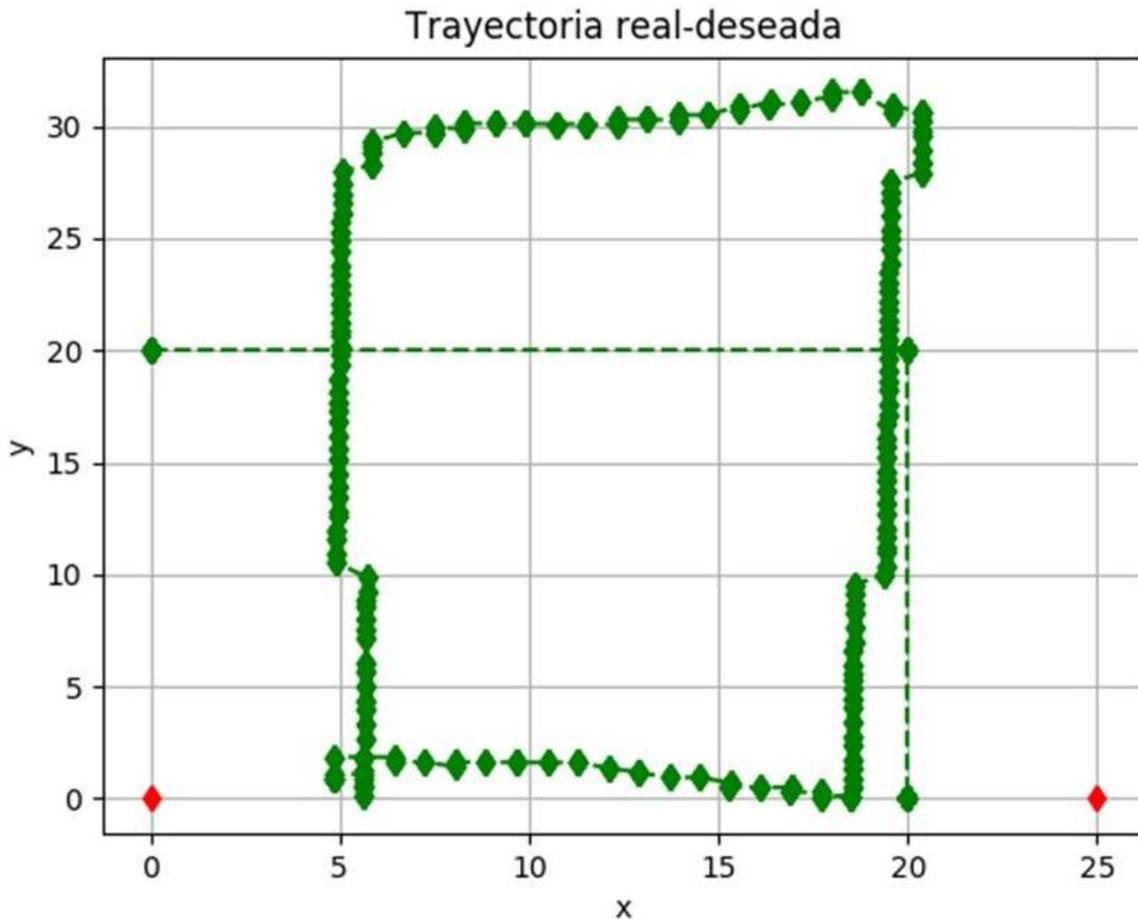


Figura 5.4: Prueba del GPS

De forma simultánea, durante este recorrido del “Delfin Explorador I” en la piscina, se recuperó y

graficó (Fig. 5.5) la información proporcionadas por la IMU. Estos datos pertenece al ángulo de guiñada ψ del vehículo.

De acuerdo con esta gráfica la guiñada inicial del USV es de 120° aproximadamente, e incrementa hasta 312° para un $t = 100s$, inmediatamente después se observa un cambio abrupto y, la guiñada se iguala a casi 0° . Este cambio abrupto es resultado del giro de 180° que realiza el USV en el punto (20, 30) para retornar a su punto de inicio.

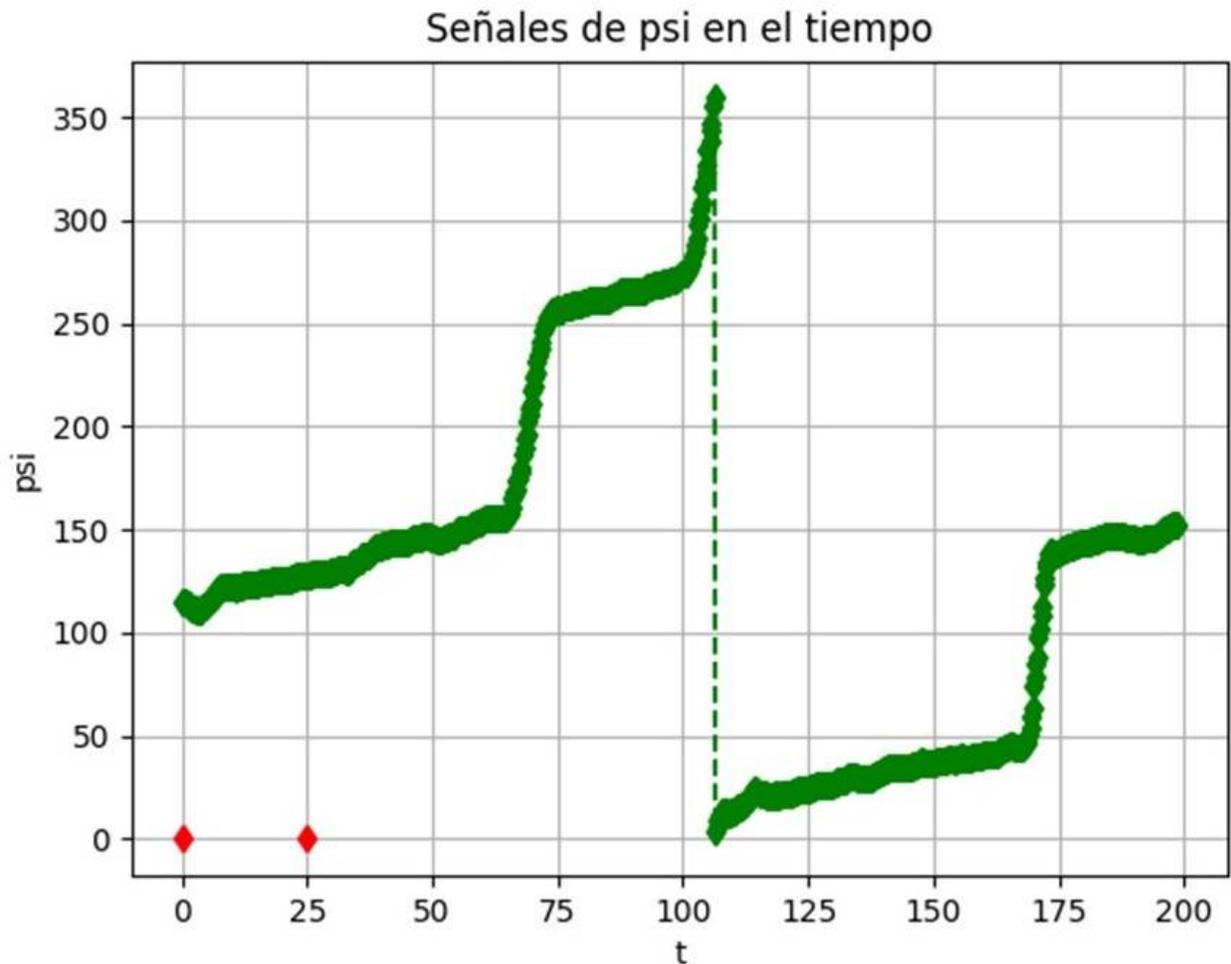


Figura 5.5: Prueba de la IMU

En estos resultados parciales, la posición cartesiana y la guiñada en la piscina del USV, “Delfin Explorador I”, se recuperan en tiempo real y de forma simultánea. Estas señales son indispensables para la implementación futura de algún tipo de control si se parte del modelo matemático descrito en este trabajo.

Además, no se tienen indicios de interferencias electromagnéticas en el funcionamiento del GPS o la

IMU que pudieran ser ocasionados por otros circuitos electrónicos o vibraciones al navegar. Cabe señalar que las condiciones del clima durante las pruebas fueron con cielo despejado.

5.2.2. Prueba de sensores y actuadores

Para probar el prototipo con sus sensores y actuadores se desarrolla un algoritmo (Fig. 5.6) que provee al USV de cuatro movimientos básicos: avance, retroceso, giro a la izquierda y derecha. Se muestra el diagrama de flujo del programa empleado en la Raspberry Pi 3 B. El programa se hizo con la finalidad de controlar el empuje de los propulsores.

En tanto, los servomotores, se mantienen en una posición fija y, orientan a los propulsores en una paralela al *eje de crujía* del USV.

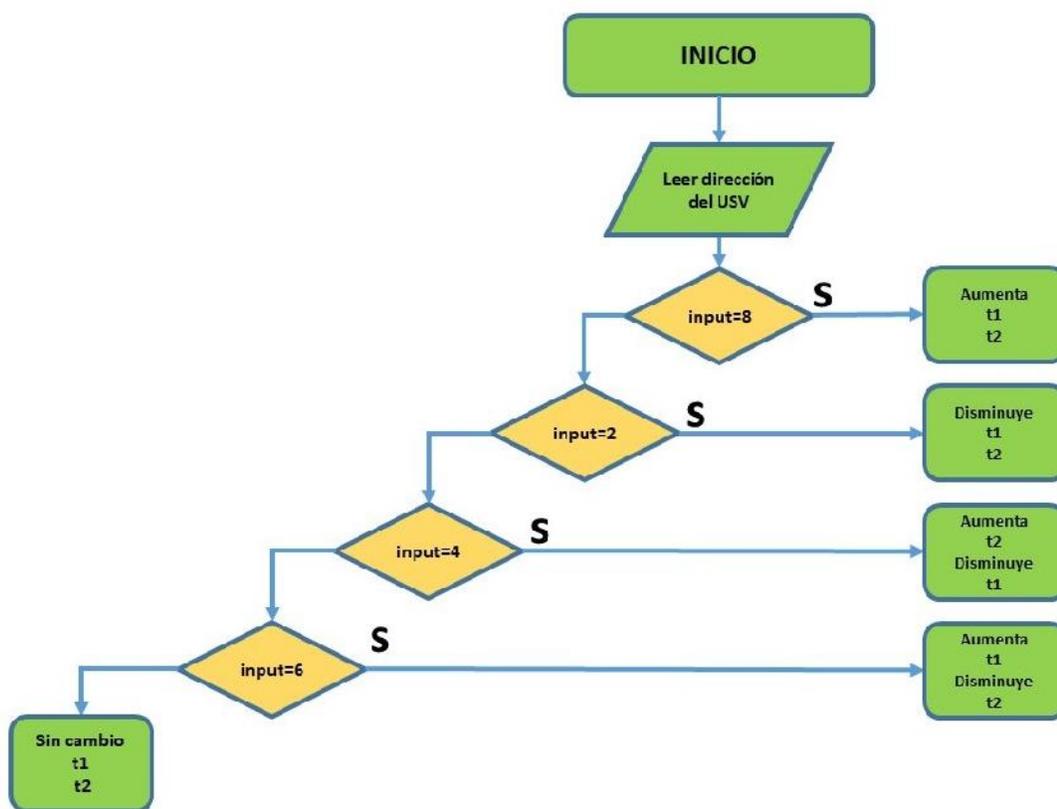


Figura 5.6: Diagramas de flujo empleado en las pruebas experimentales

El conjunto de actuadores, servomotores y propulsores constituyen, el dispositivo físico que genera la fuerza y momentos en el marco referencial del USV. Las señales involucradas son el ángulo azimutal y la señal enviada a los propulsores, que para este tipo de motor es una señal de PWM. El rango de operación para el propulsor es de $1100\mu s$ a $1900\mu s$ con una banda muerta en $1500\mu s$ (Fig. 5.7).

Para evitar un excesivo consumo de potencia, para esta prueba experimental, la máxima potencia de los propulsores se limita en $\pm 150 \mu s$ entorno a su punto neutral. De acuerdo con la información técnica proporcionada por el fabricante, el consumo para este rango de trabajo es menor al 30 % con alimentación de 12 voltios.

Con la finalidad de establecer una comunicación permanente con la Raspberry Pi 3 B en la ejecución de este programa, se requiere de una computadora portátil y una *red de área local* con la cobertura suficiente. Sin embargo, la información generada por los sensores se almacena en la memoria interna de la Raspberry.

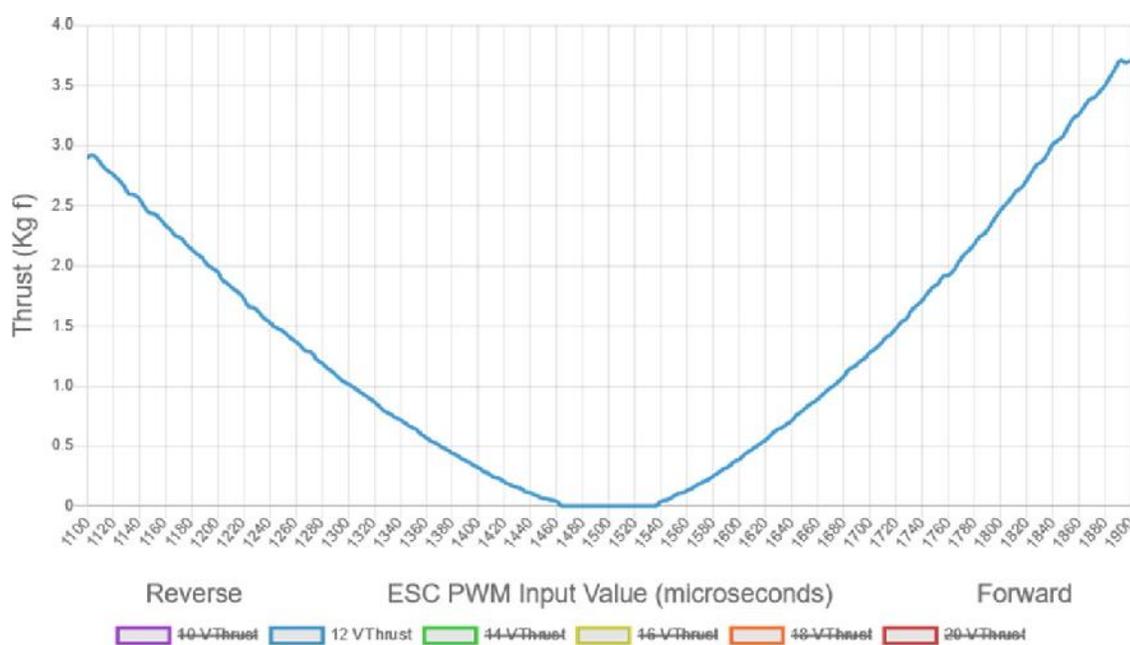


Figura 5.7: Curva característica de los propulsores

Para iniciar la prueba, se sitúa al USV en $(0, 0)$. Los movimientos del USV se seleccionan de forma aleatoria y remota. En la Fig.5.8, se muestra la ubicación física (en metros) del USV en la piscina universitaria.

Cada punto en color verde representa una *muestra* de la posición que recupera la Raspberry Pi 3B del GPS. Las *líneas punteadas* entre cada *muestra* del GPS son parte de las propiedades de la gráfica. Pero, permiten distinguir los lapsos de tiempo en el que el GPS no envía un nuevo dato. La amplitud de estas líneas punteadas depende de la rapidez del USV al desplazarse en la piscina.

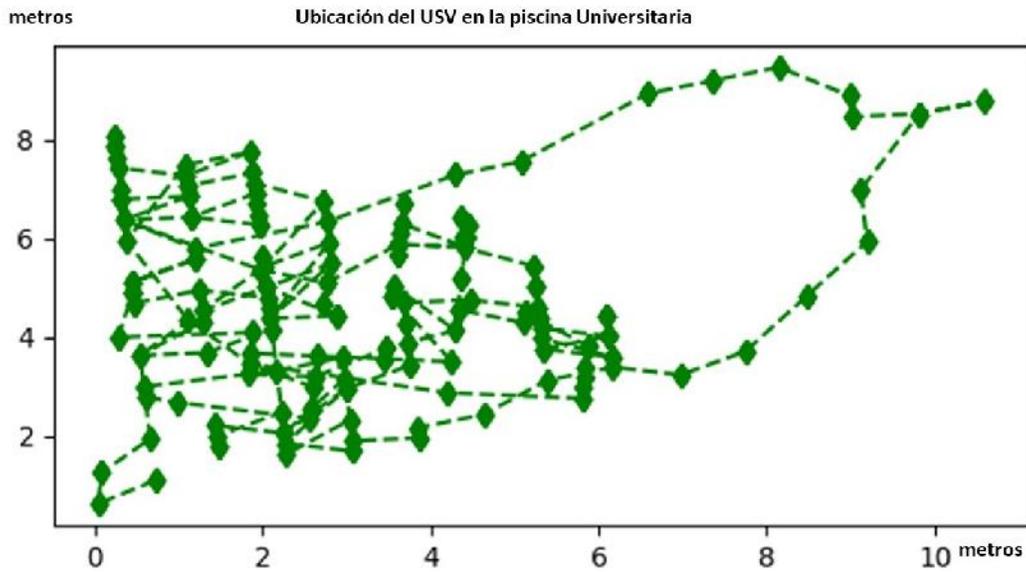


Figura 5.8: Prueba de sensores y actuadores, GPS

De forma simultánea, se tiene acceso a la información que genera la IMU hacia la Raspberry Pi 3B. En la gráfica (Fig. 5.9) se vierten los datos correspondientes a los primeros ochenta segundos de navegación del USV. El eje horizontal es el tiempo t y el vertical, el valor de ψ en radianes. Por ejemplo, para $t = 0$, $\psi = 0,7$ rad y para $t = 60$, $\psi = 2,6$ rad.

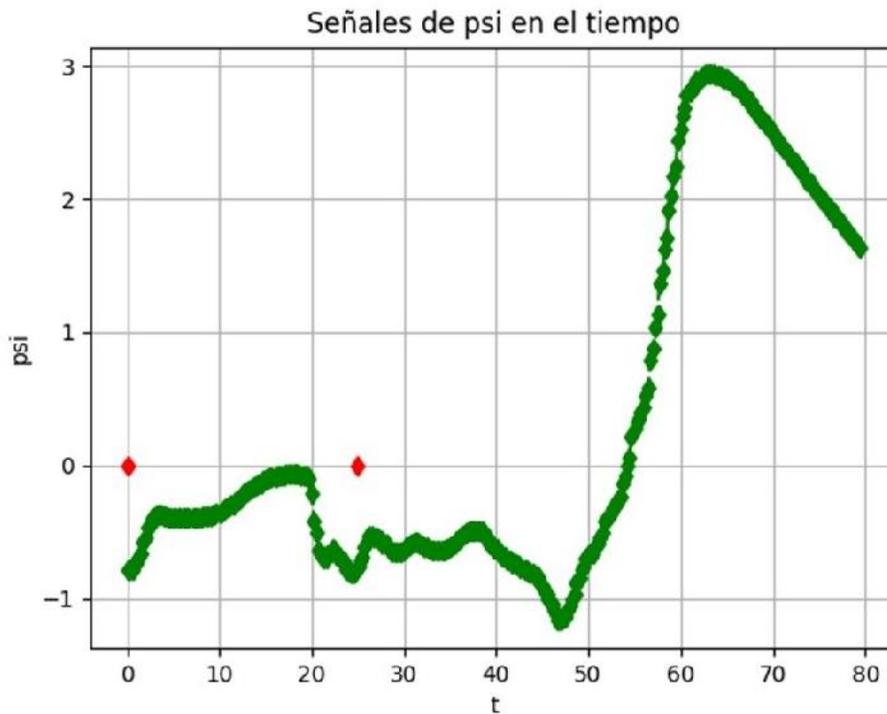


Figura 5.9: Prueba de sensores y actuadores, IMU

Por otra parte, las pruebas de navegación, a baja velocidad en un ambiente con poca perturbación, como la piscina, aseguran que éste USV es capaz de realizar maniobras básicas mediante el uso de sólo dos propulsores azimutales. El empuje generado por la combinación de ambos propulsores es suficiente para hacer navegar al USV.

A esta velocidad de navegación no se tienen muestras de inestabilidad ni de daños estructurales del USV aun después de experimentar ligeras colisiones con las paredes de la piscina.

De acuerdo con estos resultados parciales, a baja potencia de operación, los propulsores son capaces de proporcionar el empuje suficiente al USV, “Delfin Explorador I”. Este aspecto es de importancia si se desea un mayor ahorro energético, ya que el máximo consumo de energía se debe a los propulsores.

Las dos pruebas experimentales descritas en hasta este momento están inspiradas en el conjunto de maniobras abordadas en la sección 2.4, como lo es la prueba en *zig-zag*.

5.3. Prueba de la ley de control PD

La ley de control (2.31) ligada a este algoritmo se ha abordado en el segundo capítulo. Para llevar a cabo esta prueba experimental, se inicia con la programación de la Raspberry Pi 3 B.

Consideraciones de la programación en Python:

- Cada conjunto de valores que recupera la Raspberry constituyen el vector de posición y orientación del USV, η , $[m; rad]$. El algoritmo debe almacenar estos datos.
- Los valores deseados se denominan η_d y son capturados por el operador al iniciar la ejecución del algoritmo.
- Para calcular la señal de error e , el algoritmo debe ser capaz de calcular previamente las derivadas de η . Esta operación se realiza mediante derivación numérica¹.
- La ley de control (2.31) está constituida por un conjunto de operaciones matriciales, en este sentido se aprovechan la versatilidad de la librerías de Python.
- Para controlar el USV se requieren las señales u y a , la cual parte de una matriz que no es cuadrada. Para simplificar este problema se hace uso de las ecuaciones que provee las ecuaciones del bloque de asignación de señales *control allocation*

¹Es una técnica de análisis numérico para calcular la derivada de una función en un punto.

Para una mejor ilustración de lo mencionado, se agrega un diagrama de flujo (Fig. 5.10) del algoritmo que se describe.

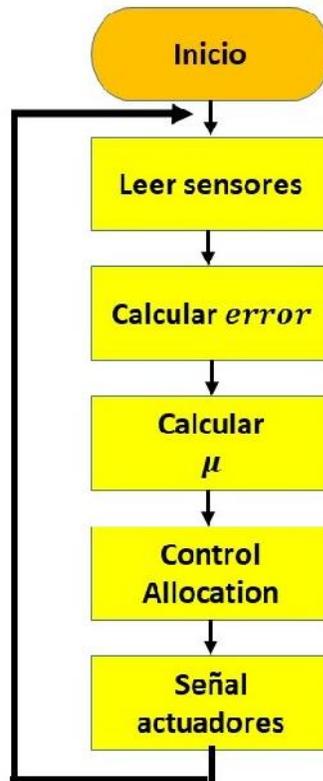


Figura 5.10: Diagrama de flujo del PD

Desplazamiento a una posición constante

En las siguientes gráficas se mantiene el siguiente código de colores para las diferentes señales: (1) En color verde, error e en la coordenada x , servomotor y propulsor en babor. (2) En color rojo, error e en la coordenada y . Servomotor y propulsor en estribor. Se observa que, cuando se superponen prevalece la roja.

La prueba de desplazamiento a una posición constante es la segunda prueba propuesta en [4]. De ahí el interés de documentar la prueba experimental.

USV situado al sur de la coordenada deseada. Las condiciones de inicio, se expresa mediante el vector de inicio $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$ y los estados deseados del sistema son $\eta_d = [20, 20, \pi/2]^T$. Se recuerda que el vector deseado es ingresado a la Raspberry Pi 3B por el operador. Las señales correspondientes a los valores deseados de η_d permanecen durante el tiempo de ejecución del algoritmo (Fig. 5.11).

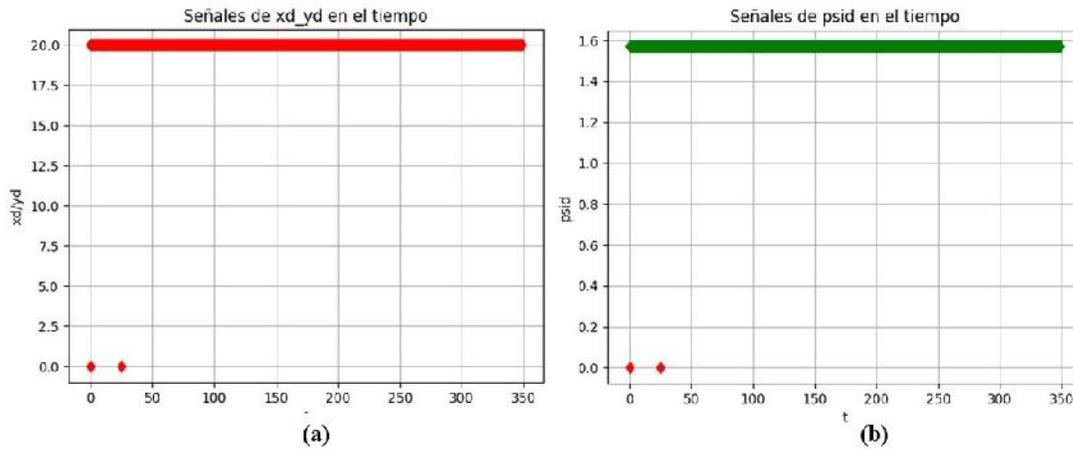


Figura 5.11: Estados deseados η_d del USV cuando inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$

Las señales de error ingresan a la siguiente etapa del controlador PD. En estas gráficas (Fig. 5.12) se observa que el error para las coordenadas x y y disminuyen con el tiempo, pero se observa que tiende a oscilar a una frecuencia 0.02 Hz. En tanto que el error de ψ se encuentra oscilado a 0.014 Hz, aproximadamente.

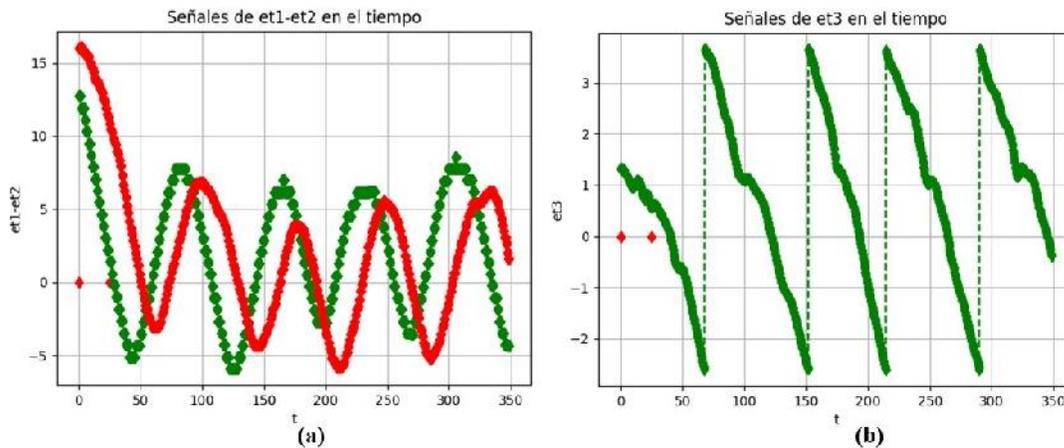


Figura 5.12: Error para las variables x , y y ψ cuando el USV inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$

El monitoreo de las señales en los actuadores (Fig. 5.13), es una oportunidad para interpretar lo que sucede mientras el USV continúa en movimiento. Se observa que el servomotor en babor mantiene un mayor ángulo de trabajo que el servomotor en estribor, esta característica se sostiene durante los 350 segundos que dura la prueba. Además, ambos propulsores se mantienen trabajando a su máxima potencia, pues se distingue en la gráfica un valor de $1650\mu s$ que corresponde al ancho del pulso de la señal PWM. Entre el intervalo de tiempo de 150 a 200 segundos, se observa una ligera disminución en la potencia del propulsor de babor.

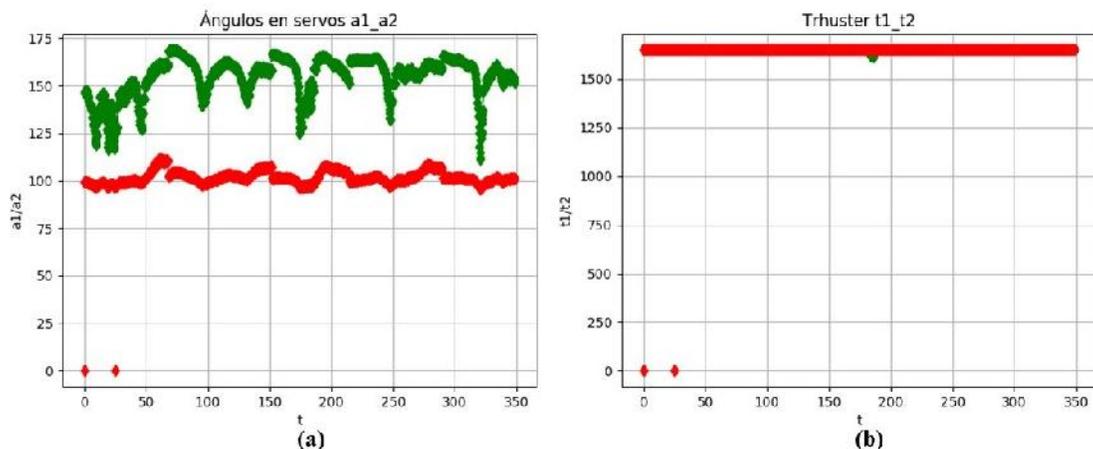


Figura 5.13: Señales en los servomotores y propulsores del cuando el USV inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$

El efecto de la operación de los propulsores azimutales se traduce en el desplazamiento del USV. Desde que inicia su recorrido el USV mantiene una tendencia hacia la posición deseada. Pero su aproximación hacia la coordenada (20, 20) no mejora con el tiempo. Hay una oscilación física en un diámetro de trece metros aproximadamente.

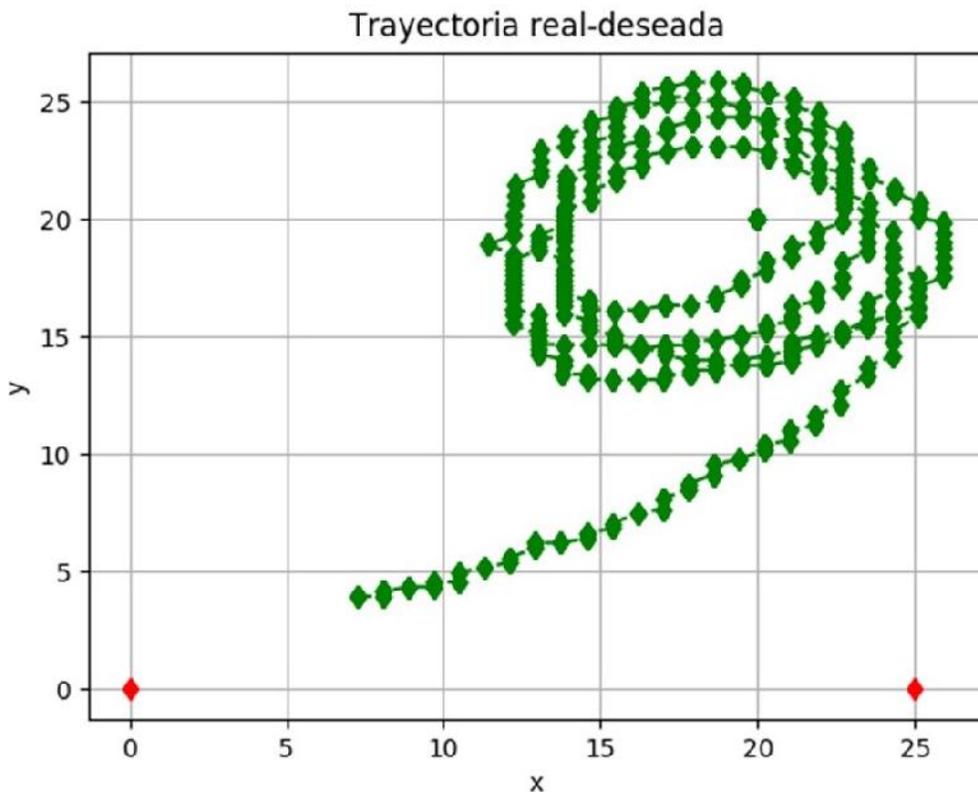


Figura 5.14: Trayectoria cuando el USV inicia en $\eta = [7, 4, \pi/2]^T$

Los valores de los parámetros se determinaron de forma experimental (Tabla 5.2).

Tabla 5.2: Valores experimentales de las ganancias del controlador, con el USV al sur

Valores experimentales	Valor
Kp1	3.5
Kp1	1.5
Kp1	0.3
Kd1	0.42
Kd2	1.5
Kd3	1.5

USV situado al norte de la coordenada deseada. Las condiciones de inicio para esta prueba, es por un lado el vector de inicio $\eta = [10, 31, 0]^T$ y los estados deseados del sistema son $\eta_d = [20, 20, \pi/2]^T$. Los valores para η_d permanecen durante toda esta prueba que tiene una duración de 120 segundos (Fig. 5.15).

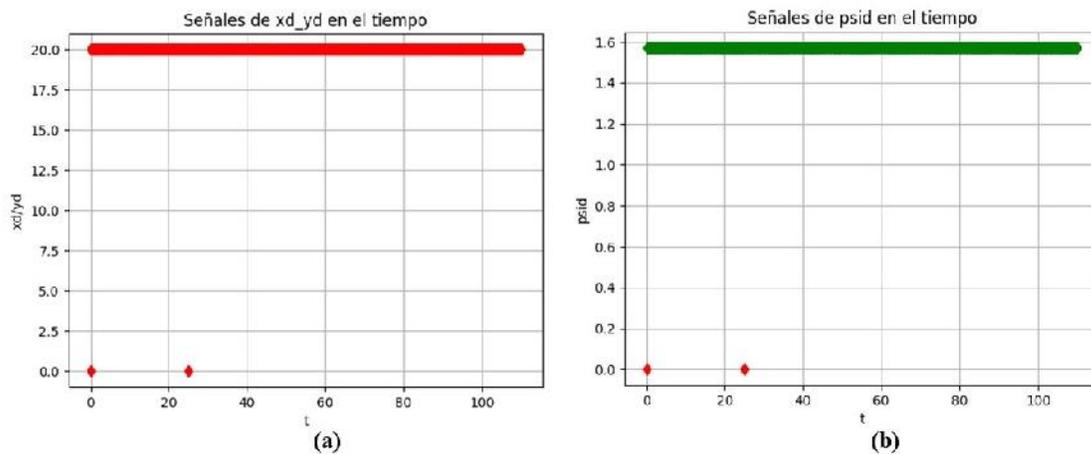


Figura 5.15: Estados deseados del USV, η_d

Se observa (Fig. 5.16) que el error para las coordenadas x y y decrece con el tiempo con una rapidez mayor que la prueba anterior. La primera cresta para y tiene una amplitud de siete metros, aproximadamente y, la segunda cresta cae a menos de dos metros en 35 segundos. Pero, también se observa cierta oscilación con una amplitud inferior a los 2 metros. En tanto que el error de ψ se encuentra oscilando a 0.011 Hz, aproximadamente.

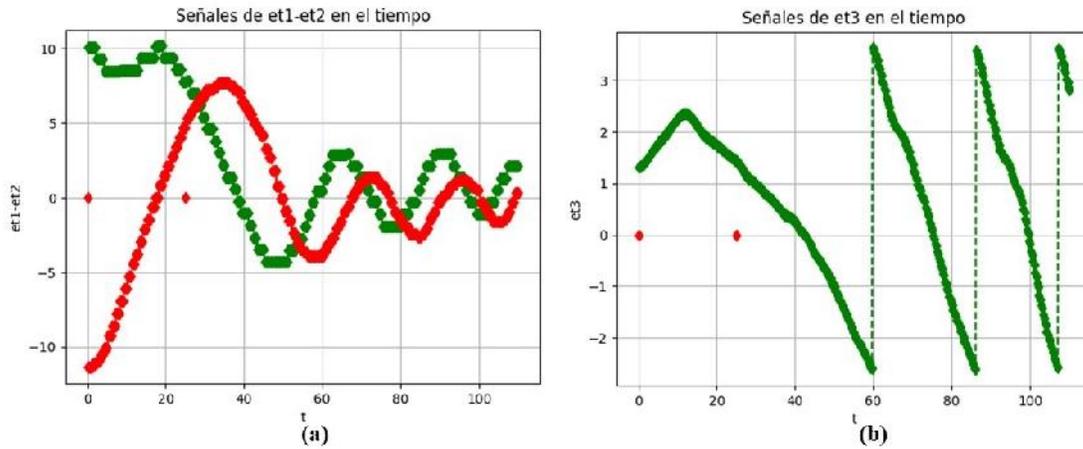


Figura 5.16: Error para las variables x , y y ψ del USV

En esta prueba, se observa mayor actividad en el servomotor instalado en babor y mantiene un mayor ángulo de trabajo que el servomotor en estribor, esta característica se sostiene durante los 120 segundos que dura la prueba. Además, ambos propulsores se mantienen trabajando a su máxima potencia, pues se distingue en la gráfica un valor de $1650\mu s$ que corresponde al ancho del pulso de la señal PWM. Entre el intervalo de tiempo de 60 a 100 segundos, se observa una ligera disminución en la potencia del propulsor de babor.

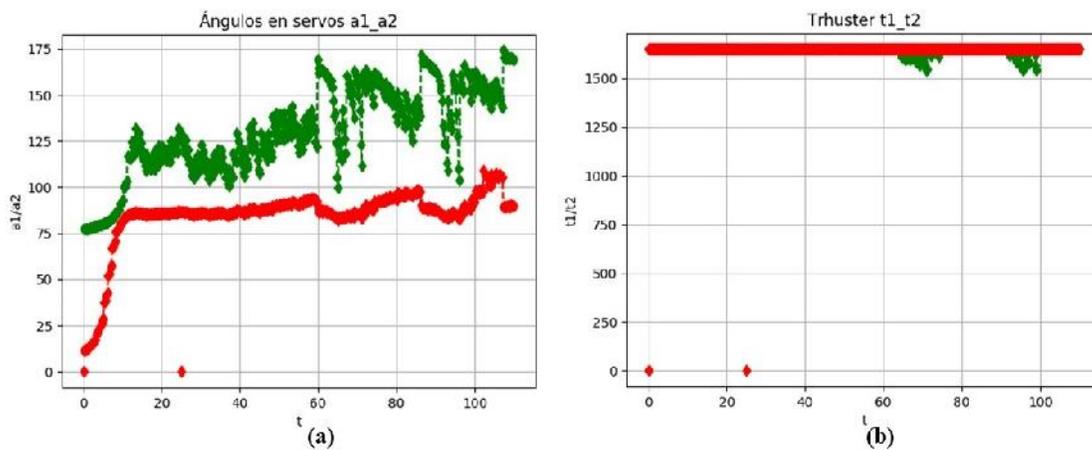


Figura 5.17: Señales en los servomotores y propulsores del USV

Desde que inicia su recorrido el USV mantiene una tendencia hacia la posición deseada. Su aproximación hacia la coordenada $(20, 20)$ se traduce en una oscilación física en un diámetro de cuatro metros aproximadamente.

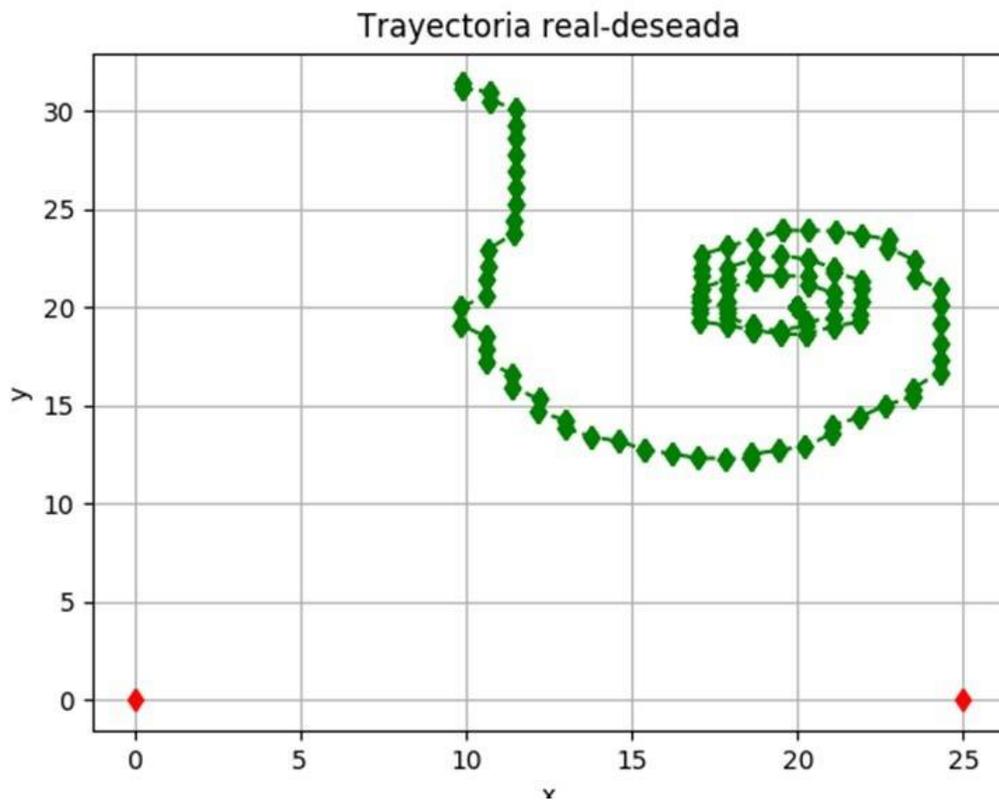


Figura 5.18: Trayectoria del USV

Los parámetros se determinaron de forma experimental (Tabla. 5.3)

Tabla 5.3: Valores experimentales, con el USV al norte

Valores experimentales	Valor
Kp1	4.55
Kp1	4.55
Kp1	1.3
Kd1	0.25
Kd2	0.25
Kd3	0.25

La información vertida en esta sección es producto de muchas pruebas experimentales. Algunas anteriores a esta se comparten en el Anexo E

Conclusión

En el presente capítulo se presentaron en tres pruebas experimentales en el mismo orden de realización, cada una de ellas permitió realizar la siguiente. De forma global, con estos resultados queda demostrado que es posible controlar el USV, “Delfin Explorador I” mediante un controlador PD, debido a que los resultados son aceptables con rangos de error relativamente pequeños. Mediante una sintonización correcta se puede mejorar el desempeño del controlador propuesto.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se investigó acerca del diseño y construcción de un Vehículo de Superficie no Tripulado. La construcción de este prototipo conjugó cuatro aspectos importantes. (1) El uso de los recursos actuales de la manufactura, dibujo asistido por computadora, impresión 3-D y del control numérico por computadora. (2) La versatilidad de los dispositivos electrónicos, capaces de proporcionar los ángulos de euler y coordenadas geográficas. (3) El software y la computadora que pueden procesar toda la información entregada. (4) Y adicionalmente, la complejidad de las matemáticas que permiten modelar e interpretar las ecuaciones involucradas. Así, este proyecto ha integrado de forma contundente las grandes áreas de la mecatrónica.

De acuerdo con los resultados del *desplazamiento a una posición constante*. El USV construido, mantiene un comportamiento previsto en [4], es decir, específicamente se ha cubierto la expectativa en esta prueba, o al menos se ha dirigido esta investigación en la dirección correcta. Como se indicó en el capítulo anterior, las ganancias se obtuvieron de forma experimental, por lo que no se puede afirmar que se han determinado los parámetros más convenientes.

Los objetivos planteados al principio de este trabajo se alcanzaron en plenitud. Desde la selección del Diseño, embarcación tipo catamarán, hasta las últimas pruebas experimentales.

Pero, en este proceso de pruebas experimentales la calidad de los sensores y actuadores juegan un papel importante, la rapidez de entrega de información del GPS y de la IMU podría poner en riesgo todos los resultados.

Además, las pruebas experimentales demuestran que es posible complementar la tarea asignada al USV con el Posicionamiento Dinámico, y evitar que el UVS permanezca en oscilación en las cercanías del estado deseado. Esta técnica se usa en nuestros días en buques y plataformas, lo que permite que estas

embarcaciones compensen las perturbaciones y mejoren su maniobrabilidad en condiciones adversas.

Este trabajo ha permitido sentar un precedente en investigaciones futuras de un área que no ha sido explotado en términos experimentales.

6.1. Trabajo Futuro

- Probar una técnica diferente de control sería conveniente para los investigadores interesados en este tema, Control por Modos Deslizantes (SMC, Sliding Mode Control), por ejemplo.
- Incrementar la potencia de los propulsores y probar el USV ante viento y oleaje más intenso, es decir, verificar el comportamiento en el mar.
- Implementar un sistema de ventilación adicional para los componentes electrónicos.
- Integrar a esta plataforma una fuente de energía renovable. El suministro de energía es un aspecto importante en tareas de navegación prolongada.
- Considerar un modelo basado en propulsores no azimutales.
- Poner en operación el mecanismo para sumergir los sensores de batimetría y realizar batimetrías.

Bibliografía

- [1] Massachusetts Institute of Technology. url: <http://web.mit.edu>, S.F.
- [2] ResearchGate. url: <https://www.researchgate.net>, S.F.
- [3] Public Library of Science. url: <https://journals.plos.org>, S.F.
- [4] Manuel Velueta. Navegación autónoma de un vehículo acuático no tripulado dedicado a la exploración de zonas costeras. Master's thesis, Universidad Autónoma del Carmen, 2018.
- [5] Thor I Fossen. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons, 2011.
- [6] Github. url: <https://github.com>, S.F.
- [7] Sable CNC producten. url: <http://www.cnc-sable.nl>, S.F.
- [8] RepRap. url: <https://reprap.org>, S.F.
- [9] 3DGadgets. url: <http://3dgadgets.my>, S.F.
- [10] Massachusetts Institute of Technology. url: <https://mitmuseum.mit.edu>, S.F.
- [11] Raspberry Pi Foundation. url: <https://www.raspberrypi.org>, S.F.
- [12] Adafruit Industries. url: <https://www.adafruit.com>, S.F.
- [13] Blue Robotics Inc. url: <https://bluerobotics.com>, S.F.
- [14] PythonTM. url: <https://www.python.org/>, S.F.
- [15] Arduino. url: <https://www.arduino.cc/>, S.F.
- [16] Newfangled Solutions. url: <https://www.machsupport.com>, S.F.

- [17] Thor Inge Fossen. *Nonlinear modelling and control of underwater vehicles*. Fakultet for informasjonsteknologi, matematikk og elektroteknikk, 1991.
- [18] Justin Manley. Development of the autonomous surface craft “aces”. volume 2, pages 827 – 832 vol.2, 11 1997.
- [19] Hugo Ferreira, Alfredo Martins, André Dias, Carlos Almeida, José M Almeida, and Eduardo P Silva. Roaz autonomous surface vehicle design and implementation. *Robótica Control, Automação, instrumentação*, 2007.
- [20] Manuel J Velueta Guzmán, José L Rullán Lara, José A Ruz Hernández, and Hussain Alazki. Robust control for the dynamics of an unmanned surface vehicle under the perturbations (marine waves and currents). In *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [21] Yufei Liu and Noboru Noguchi. Development of an unmanned surface vehicle for autonomous navigation in a paddy field. *Engineering in agriculture, environment and food*, 9(1):21–26, 2016.
- [22] Yu-lei Liao, Yi-ming Li, Lei-feng Wang, Ye Li, and Quan-quan Jiang. Heading control method and experiments for an unmanned wave glider. *Journal of Central South University*, 24(11):2504–2512, 2017.
- [23] Ru-jian Yan, Shuo Pang, Han-bing Sun, and Yong-jie Pang. Development and missions of unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Application*, 9(4):451–457, 2010.
- [24] Khac Duc Do and Jie Pan. *Control of ships and underwater vehicles: design for underactuated and nonlinear marine systems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [25] Thor I Fossen. *Guidance and control of ocean vehicles*. Wiley, 1994.
- [26] Thor I Fossen and Tor A Johansen. A survey of control allocation methods for ships and underwater vehicles. In *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1–6. IEEE, 2006.
- [27] M Jesús, Joaquín Aranda Almansa, and José M Girón Sierra. Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 9(3):205–218, 2012.

- [28] Katsuhiko Ogata. Ingeniería de control moderna 5ta ed, 2010.
- [29] Francisco Gonzalez-Longatt. Capítulo 1: Introducción a los sistemas de control, 02 2016.
- [30] Karl Johan Åström and Tore Hägglund. *Control PID avanzado*. Pearson, Madrid, 2009.
- [31] S Dormido Bencomo and F Morilla García. Controladores pid. fundamentos, sintonía y autosintonía, 2000.
- [32] Trong Dong Nguyen, Asgeir J Sørensen, and Ser Tong Quek. Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions. *Automatica*, 43(5):768–785, 2007.
- [33] Serope Kalpakjian and Steven R Manufoctura Schmid. ingeniería y tecnología. *México: Editorial Pearson Educación*, 2002.
- [34] Oswaldo Rojas Lazo and Luis Rojas Rojas. Diseño asistido por computador. *Industrial Data*, 9(1):7–15, 2006.
- [35] John A Schey, Javier León Cárdenas, et al. *Procesos de manufactura*. 2002.
- [36] Felipe Díaz del Castillo Rodríguez. Impresión 3d, una introducción. url: <http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx>, S.F.
- [37] Rainer Christoph, Romeo Munoz, and Angel Hernández. Manufactura aditiva. *Realidad y Reflexión*, 43:97, 04 2017.
- [38] Peter Smid. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Industrial Press Inc., 2003.
- [39] Sergio Gómez González. El gran libro de solidworks. *Editorial Alfaomega Grupo Editor*, 2008.
- [40] Fisherunitech. url: <https://www.fisherunitech.com>, S.F.
- [41] Airwolf3d. url: <https://airwolf3d.com/shop/pla-premium/>, S.F.
- [42] Oswaldo Lazo. Dibujo asistido por computador en la facultad de ingeniería industrial - unmsm. *Industrial Data*, 8:018, 03 2014.
- [43] u blox. url: <https://www.u-blox.com>, S.F.

- [44] R Bedri. Advocating the substitution of the cnc2 course by a cad/cam course in the production curriculum.
- [45] Cesar Higuera. Implementación del control de un vehículo subacuático. Master's thesis, Instituto Tecnológico de la Paz, 2016.
- [46] Tor A Johansen and Thor I Fossen. Control allocation—a survey. *Automatica*, 49(5):1087–1103, 2013.
- [47] Tor Arne Johansen, Thor I Fossen, and Stig P Berge. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoidance using sequential quadratic programming. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(1):211–216, 2004.
- [48] The Society of Naval Architecture SNAME and Marine Engineers. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No.*, pages 1–5, 1950.
- [49] Yu-lei Liao, Yu-min Su, and Jian Cao. Trajectory planning and tracking control for underactuated unmanned surface vessels. *Journal of Central South University*, 21(2):540–549, 2014.
- [50] Yu-lei Liao, Ming-jun Zhang, Lei Wan, and Ye Li. Trajectory tracking control for underactuated unmanned surface vehicles with dynamic uncertainties. *Journal of Central South University*, 23(2):370–378, 2016.
- [51] Mojtaba Mirzaei, Mohammad Eghtesad, and Mohammad Mahdi Alishahi. A new robust fuzzy method for unmanned flying vehicle control. *Journal of Central South University*, 22(6):2166–2182, 2015.
- [52] Wasif Naeem, Robert Sutton, and Tao Xu. An integrated multi-sensor data fusion algorithm and autopilot implementation in an uninhabited surface craft. *Ocean Engineering*, 39:43–52, 2012.
- [53] Mikkell Eske Nørgaard Sørensen and Morten Breivik. Comparing combinations of linear and nonlinear feedback terms for motion control of marine surface vessels. *IFAC-PapersOnLine*, 49(23):303–310, 2016.
- [54] Peter H Heins, Bryn Ll Jones, and Dominic J Taunton. Design and validation of an unmanned surface vehicle simulation model. *Applied Mathematical Modelling*, 48:749–774, 2017.

- [55] Hossein Mousazadeh, Hamid Jafarbiglu, Hamid Abdolmaleki, Elham Omrani, Farshid Monhaseri, Mohammad-reza Abdollahzadeh, Aref Mohammadi-Aghdam, Ali Kiapei, Yousef Salmani-Zakaria, and Ashkan Makhsoos. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an unmanned surface vehicle (usv) by algorithms fusion. *Ocean Engineering*, 159:56–65, 2018.
- [56] Yufei Liu, Noboru Noguchi, and Takeshi Yusa. Development of an unmanned surface vehicle platform for autonomous navigation in paddy field. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):11553–11558, 2014.
- [57] Minju Kang, Sungchur Kwon, Jeonghong Park, Taeyun Kim, Jungwook Han, Jeonghyeon Wang, Seonghun Hong, Yeonjoo Shim, Sukmin Yoon, Byunghyun Yoo, et al. Development of usv autonomy for the 2014 maritime robotx challenge. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16):13–18, 2015.
- [58] Đula Nađ, Nikola Mišković, and Filip Mandić. Navigation, guidance and control of an overactuated marine surface vehicle. *Annual Reviews in Control*, 40:172–181, 2015.
- [59] Yuanchang Liu and Richard Bucknall. Path planning algorithm for unmanned surface vehicle formations in a practical maritime environment. *Ocean Engineering*, 97:126–144, 2015.
- [60] Chuang Zhang, Chen Guo, and Daheng Zhang. Ship navigation via gps/imu/log integration using adaptive fission particle filter. *Ocean Engineering*, 156:435–445, 2018.
- [61] Dan Hermann, Roberto Galeazzi, Jens Christian Andersen, and Mogens Blanke. Smart sensor based obstacle detection for high-speed unmanned surface vehicle. *IFAC-PapersOnLine*, 48(16):190–197, 2015.
- [62] Ramon Silva-Ortigoza, H Sira-Ramírez, and VM Hernández-Guzmán. Control por modos deslizantes y planitud diferencial de un convertidor de cd/cd boost: Resultados experimentales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 5(4):77–82, 2008.

Anexos

Apéndice A

Código G

En general un programa contiene instrucciones estandarizadas por la EIA e ISO, esta instrucciones se pertenecen a los códigos G o funciones “M”, misceláneas. En la tabla siguiente, se muestra algunos códigos G.

Los códigos G se utilizan para ordenar acciones específicas para la máquina: Movimientos simples de la máquina Funciones de taladrado, o más complejas que pueden implicar herramientas motorizadas opcionales.

Cada código G tiene un número de grupo, por ejemplo: Grupo 1, Ordena movimientos punto a punto de los ejes de la máquina Grupo 7, son de funcionalidad de Compensación de la herramienta de corte.

Cada grupo tiene un código G dominante; referido como el código G predeterminado. Un código G predeterminado significa que son los que la máquina utiliza en cada grupo salvo que se especifique otro código G del grupo.

Los comandos de código G pueden ser modales o no . Un código G modal permanece activo hasta el final del programa o hasta que otro código G del mismo grupo lo sustituya. Un código G no modal solo afecta a la línea de programa en la que se encuentra, no afecta a la siguiente línea de programa, inmediatamente desactivados por el control. Los códigos del Grupo 00 son no modales; los otros grupos son modales.

Tabla A.1: Significado del código G en un programa de CNC

CÓDIGO G	SIGNIFICADO
G00	Posicionamiento rápido
G01	Interpolación Lineal
G02	Interpolación Circular en sentido horario
G03	Interpolación Circular en sentido antihorario
G04	Temporización
G05	Arista matada
G06	Interpolación Circular con centro en absolutas
G07	Arista viva
G08	Arco tangente a la trayectoria anterior
G09	Interpolación Circular definida por tres puntos
G10	Anulación imagen espejo
G11	Imagen espejo en eje X
G12	Imagen espejo en eje Y
G13	Imagen espejo en eje Z
G17	Plano XY
G18	Plano XZ
G19	Plano YZ
G20	Llamada a sub-rutina standard
G21	Llamada a sub-rutina paramétrica
G22	Definición de sub-rutina standard
G23	Definición de sub-rutina paramétrica
G24	Final de definición de sub-rutina
G25	Llamada incondicional

Las funciones M producen Se utilizan para programar las funciones especiales de la máquina como las siguientes: arranque o paro del husillo, arranque o paro del suministro de líquido refrigerante

- M00 Paro de programa
- M00 Paro de programa

- M01 Paro condicional del programa
- M02 Fin del programa
- M03 Arranque del husillo en sentido horario
- M04 Arranque del husillo en sentido anti-horario
- M05 Paro del husillo
- M06 Cambio de herramienta
- M30 Fin del programa y reset de variables

Ejemplo:

N73 G01 X33 Y15 Z22 F155 S750

Número de bloque 73: mueve la herramienta desde la última coordenada $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ a la coordenada (33, 15, 22), el movimiento es a través de una trayectoria lineal, a una velocidad de 155 mm/min, y con el husillo girando a 750 rev/min.

Apéndice B

Mach3

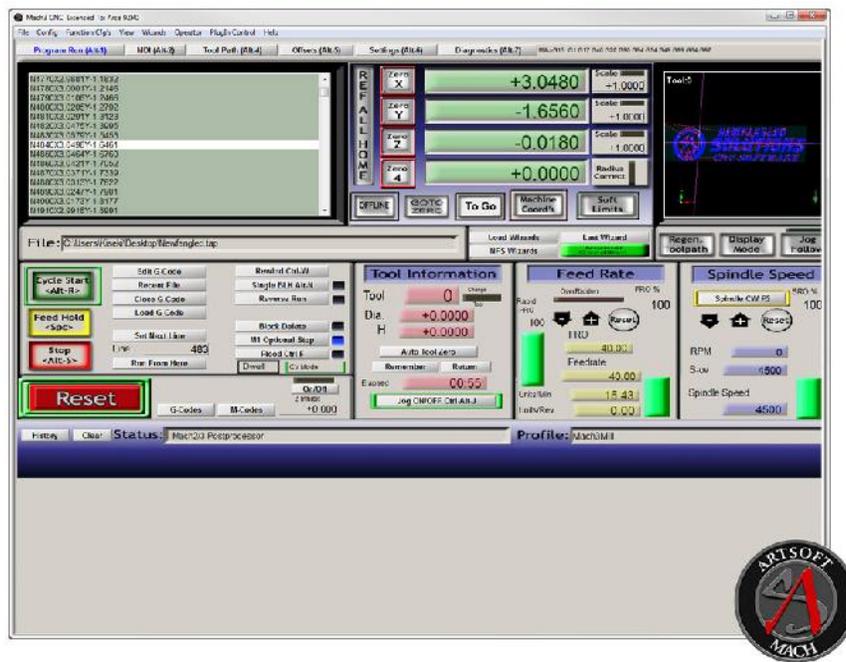


Figura B.1: Match 3 es la versión de programa empleado para este trabajo, recuperado de [16]

Mach3 convierte una PC con Windows en un controlador de máquina CNC.

Mach3 es muy rico en características y ofrece un gran valor para aquellos que necesitan un paquete de software de control CNC. Mach3 funciona en la mayoría de las PC con Windows para controlar el movimiento de los motores (paso a paso y servo) mediante el procesamiento de G-Code. Si bien comprende muchas características avanzadas, es el software de control CNC más intuitivo disponible. Mach3 es personalizable y se ha utilizado para muchas aplicaciones con numerosos tipos de hardware.

El software se ejecutará en modo Demo hasta que un archivo de licencia lo "desbloquee". Mientras está en modo Demo, el software se puede probar con las limitaciones enumeradas en la página de detalles completos del producto [16].

Apéndice C

GPIO

General Purpose Input Output (GPIO) es una fila a lo largo de la cara superior de la placa, son pines de entrada y salida de propósito general. Todos los modelos de Raspberry lo incluyen con diferencias tanto en cantidad como en funcionalidad: en la versión 1 de Raspberry Pi es de 26 pines GPIO, en la versión 2, es de 40 pines GPIO.

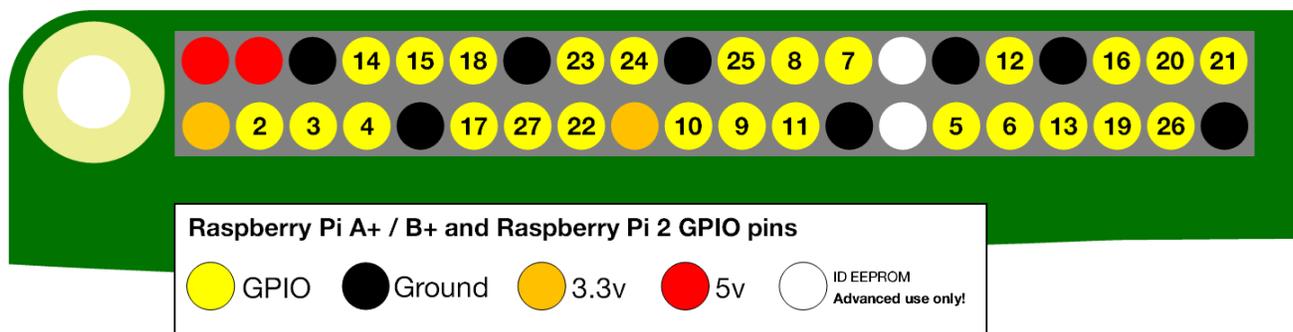


Figura C.1: La numeración de los pines GPIO no está en orden numérico, recuperado de [11]

Los pines GPIO tienen funciones específicas, se pueden agrupar de la siguiente manera:

Naranja: Alimentación a 3.3V. Rojo: Alimentación a 5V. Amarillo: Entradas / salidas de propósito general. Pueden configurarse como entradas o salidas de 3.3V. Negro (8): Conexión a GND o masa.

Existen dos maneras de numerar los pines de la Raspberry Pi, en modo GPIO o BCM.

Modo GPIO, los pines se numeran de forma física, es decir, por el lugar que ocupan en la placa.

Modo BCM, los pines se numeran por su correspondencia en el chip Broadcom (que es la CPU de la Raspberry Pi).

La intensidad de corriente que sale de esos pines proviene de la fuente de 3.3V y esta fue diseñada para una carga de unos 3mA por cada pin GPIO.

Apéndice D

T-200

El T-200 está manufacturado de plástico moldeado por inyección de policarbonato de alta resistencia y, es resistente a los rayos UV. El núcleo del motor está sellado y protegido con un recubrimiento de epoxi y utiliza cojinetes de plástico de alto rendimiento en lugar de cojinetes de acero. Todo lo que no es plástico es aluminio o acero inoxidable de alta calidad anticorrosivo.

Parameter	Value	
Performance		
Full Throttle FWD/REV Thrust @ Nominal (16 V)	5.25 / 4.1 kg f	11.6 / 9.0 lb f
Full Throttle FWD/REV Thrust @ Maximum (20 V)	6.7 / 5.05 kg f	14.8 / 11.1 lb f
Minimum Thrust	0.02 kg f*	0.05 lb f*
Electrical		
Operating Voltage	7-20 volts	
Full Throttle Current @ Nominal (16 V)	24 Amps	
Full Throttle Current @ Maximum (20 V)	32 Amps	
Full Throttle Power @ Nominal (16 V)	390 Watts	
Full Throttle Power @ Maximum (20 V)	645 Watts	
Physical		
Length	113 mm	4.45 in
Diameter	100 mm	3.9 in
Weight in Air (with 1m cable)	0.76 lb	344 g
Weight in Water (with 1m cable)	0.34 lb	156 g
Propeller Diameter	76 mm	3.0 in
Mounting Hole Threads	M3 x 0.5	
Mounting Hole Spacing	19 mm	0.75 in
Cable Length	1.0 m	39 in
Cable Diameter	6.3 mm	0.25 in

Figura D.1: Detalles técnicos del T-200, recuperado de [13]

Apéndice E

Pruebas adicionales con la ley de control PD

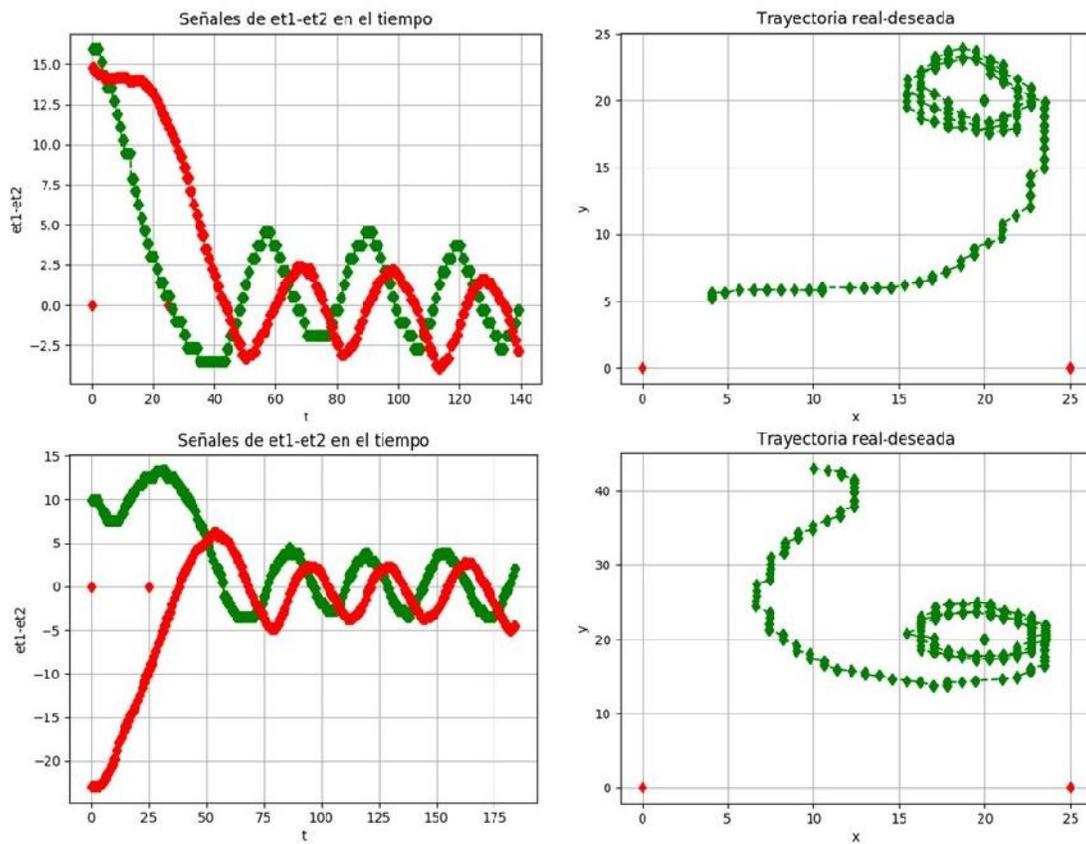


Figura E.1: Pruebas adicionales con el PD

Apéndice F

Artículo

Resultados Obtenidos:

Se envió un artículo al congreso Academia Journals Hidalgo 2019. DISEÑO DE UN VEHÍCULO ACUÁTICO NO TRIPULADO PARA ÁREAS COSTERAS.

DISEÑO DE UN VEHÍCULO ACUÁTICO NO TRIPULADO PARA ÁREAS COSTERAS

Ing. Sergio Raúl Noh Caamal¹, Ing. Baltazar de Jesús Zapata Arceo²,
Dr. Jose Luis Rullán Lara³ y Dr. Hussain Alazki⁴

Resumen— En este trabajo se presenta el diseño de un vehículo acuático no tripulado para áreas costeras (aguas poco profundas). La embarcación está basada en el tipo catamarán con dimensiones pequeñas capaz de navegar en ambientes marinos en áreas costeras donde la navegación y exploración de los vehículos sumergibles está limitada. Si se coloca uno o varios actuadores para controlar específicamente la deriva hacia los costados del barco se estaría tratando de un vehículo completamente o sobre actuado, respectivamente, en comparación con otras embarcaciones y diseños, y aprovechando un menor consumo energético para proporcionarle mayor autonomía de navegación a esta embarcación. Debido a las perturbaciones ambientales en las que opera este vehículo, como el oleaje, corrientes inducidas y viento, se restringen las características del diseño. De manera conveniente, se eligen los actuadores de este vehículo acordes al ambiente de operación, así como, la distribución entorno a la embarcación. Tanto el diseño como la navegación del vehículo acuático no tripulado se valida de manera experimental.

Palabras clave— vehículo acuático no tripulado, perturbaciones, actuadores.

Introducción

En la actualidad, los Vehículos de Superficie no Tripulados por sus siglas en inglés (Unmanned Surface Vehicle, USV) se aplican en el campo militar, inteligencia, vigilancia y operaciones de reconocimiento Yan (2010). Por autonomía se entiende que el USV es capaz de decidir sin supervisión humana. Así, estos vehículos tienen mayor autonomía y capacidad de carga útil, lo que permite transportar una variedad de equipos de medición. Su efectividad en navegación es atractiva si se desea monitorear mayores volúmenes de agua a diferencia de las boyas que están restringidas al monitoreo permanente de una coordenada fija.

Debido a que los USV's están expuestos a disturbios ambientales tales como el viento y oleaje, es importante considerar estos efectos al momento de elegir la técnica de control Velueta, et al. (2018), La potencialidad de los USV's se prevé también en las actividades civiles de transporte, monitoreo y exploración de zonas costeras y aguas poco profundas, en contraste con otro tipo de vehículos, como los sumergibles, con capacidad de acceso limitado. Ya que los USV's tienen la capacidad de navegar a partir de un mapa predefinido Liu, et. al (2016) es importante la investigación y desarrollo en estos sistemas encaminados a la sustitución del trabajo humano en áreas de aguas poco profundas.

Existen diversos trabajos con barcos autónomos, pero no fue hasta 1991 cuando Thor I. Fossen incursionó en el modelado de vehículos marinos. Se describe el modelado no lineal y control de vehículos submarinos donde se unifican algunos conceptos de mecánica clásica e hidrodinámica para obtener el modelo dinámico cinemático y cinético de un submarino. Cabe resaltar la importancia de este trabajo porque proporciona un diseño generalizado aplicable a submarinos y barcos. Se presenta un modelo no lineal de seis grados de libertad, así como un análisis de perturbaciones y estabilidad basado en un modelo linealizado a partir del modelo no lineal.

El desarrollo de vehículos no tripulados para misiones autónomas tuvo uno de sus primeros trabajos en el año de 1996 con el vehículo "ACES". Existen proyectos sobresalientes como el "ARTEMIS", que era una réplica de un barco pesquero; en verano de 2000 se probó el "AUTOCAT" ambos desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y fueron usados en aguas poco profundas. Otro ejemplo, es el denominado "ROAZ", es una embarcación de doble casco y fue diseñado para operar en ríos, estuarios y presas Ferreira (2007).

Con base a lo anterior, los objetivos de este trabajo son: presentar el diseño de un USV sub-actuado, tipo catamarán, construirlo con materiales que le permitan navegar en ambientes marinos, acondicionar los sensores para recuperar la posición cartesiana del vehículo y guiñada; así como, acondicionar actuadores para realizar pruebas experimentales

¹ Ing. Sergio Raúl Noh Caamal es Estudiante de Maestría en Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche. sergioraulnoh@yahoo.com.mx (autor corresponsal)

² Ing. Baltazar de Jesús Zapata Arceo es Profesor del Instituto Tecnológico de Lerma, Lerma, Campeche. baltazar_zapata_arceo@itlerma.edu.mx

³ Dr. Jose Luis Rullán Lara es Profesor de Ingeniería en la Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche. jrullan@pampano.unacar.mx

⁴ Dr. Hussain Alazki es Profesor de Ingeniería en la Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche. halazki@pampano.unacar.mx



UNACAR

Universidad Autónoma del Carmen
"Por la Grandeza de México"

ACUERDO PARA USO DE OBRA

A quien corresponda

PRESENTE

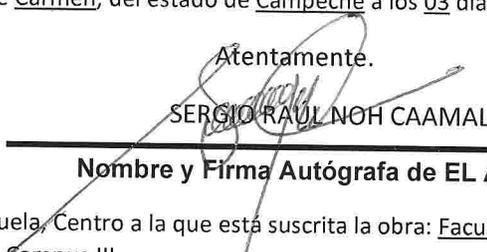
Por medio del presente escrito, **Sergio Raúl Noh Caamal** (en lo sucesivo EL AUTOR) hace constar que es titular intelectual de la obra denominada, "**Desarrollo e implementación experimental de la navegación autónoma de un vehículo acuático no tripulado dedicado a la exploración de zonas costeras**" (en lo sucesivo la OBRA), en virtud de lo cual autoriza a la Universidad Autónoma del Carmen (en lo sucesivo la UNACAR) para que efectúe resguardo físico y/o electrónico mediante copia digital o impresa para asegurar su disponibilidad, divulgación, comunicación pública, distribución, transmisión, reproducción, así como digitalización de la misma con fines académicos y sin fines de lucro como parte de Repositorio Institucional de la UNACAR (*Runacar*).

De igual manera, es deseo del AUTOR establecer que esta autorización es voluntaria y gratuita, y que de acuerdo con lo señalado en la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de Propiedad Industrial, la UNACAR cuenta con mi autorización para la utilización de la información antes señalada, estableciendo que se utilizará única y exclusivamente para los fines antes señalados. EL AUTOR autoriza a la UNACAR a utilizar las obras en los términos y condiciones aquí expresados, sin que ello implique que se le conceda licencia o autorización alguna o algún tipo de derecho distinto al mencionado respecto a la "propiedad intelectual" de la misma OBRA; incluyendo todo tipo de derechos patrimoniales sobre obras y creaciones protegidas por derechos de autor y demás formas de propiedad intelectual reconocida o que lleguen a reconocer las leyes correspondientes. Al reutilizar, reproducir, transmitir y/o distribuir la OBRA se deberá reconocer y dar crédito de autoría de la obra intelectual en los términos especificados por el propio AUTOR, y el no hacerlo implica el término de uso de esta licencia para los fines estipulados. Nada de esta licencia menoscaba o restringe los derechos patrimoniales y morales del AUTOR.

De la misma manera, se hace manifiesto que el contenido académico, literario, la edición y en general de cualquier parte de la OBRA son responsabilidad del AUTOR, por lo que se deslinda a la UNACAR por cualquier violación a los derechos de autor y/o propiedad intelectual, así como cualquier responsabilidad relacionada con la misma frente a terceros. Finalmente, el AUTOR manifiesta que estará depositando la versión final de su Tesis de maestría, OBRA y cuenta con los derechos morales y patrimoniales correspondientes para otorgar la presente autorización de uso.

En la ciudad de Carmen, del estado de Campeche a los 03 días el mes de diciembre de 2019.

Atentamente.


SERGIO RAUL NOH CAAMAL

Nombre y Firma Autógrafa de EL AUTOR

Escriba la Facultad, Escuela, Centro a la que está suscrita la obra: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Campus III.