



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO**

Diseño, modelado y control de robots micro AUV

Tesis que presenta:

M. en C. Jesús Arturo Monroy Anieva.

Para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias.

En la especialidad de:

Control Automático.

Director de Tesis:

Dr. Jorge Antonio Torres Muñoz.

Ciudad de México

Julio 2016

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por estar presente en todo momento.

A mi **Esposa; Alicia María Reveles Espinoza**, por el amor, respeto y sinceridad que me brinda en todo momento para crecer juntos.

A mi **Padre (R.I.P.)**, por todas las enseñanzas y fortalezas que dejó en mi vida.

A mi **Madre**, por todo el amor y cariño que me ha proporcionado.

A mi **Hermana**, por todo su apoyo incondicional y ser un gran ejemplo de vida.

A mi **Hermano**, por su carácter y madurez para hacer frente cualquier adversidad.

Al **CONACYT**, por otorgarme una beca para poder realizar mis estudios de doctorado.

Al **Dr. Jorge A. Torres Muñoz**, por ser asesor de este proyecto de tesis y ofrecerme las herramientas necesarias de trabajo.

A mis **Amigos**, por su compañía en buenos y malos momentos, además de ofrecerme su brazo ante las caídas.

Al personal de apoyo del DCA y en especial a la secretaria Sonia Alfaro por agilizar lo concerniente para llevar a cabo el examen doctoral en tiempo favorable.

A todos mis **Sinodales**, quienes se dieron un espacio para revisar este trabajo de tesis.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se aborda el problema de control en regulación de la orientación y posición de vehículos submarinos de pequeña escala (μ AUVs), considerando el diseño mecánico y análisis del modelado de estos vehículos para efectuar las leyes de control (PID, PD saturado y PD no lineal), siendo éstas validadas mediante simulación y experimentación. Se describe el modelo dinámico de los prototipos basados en las ecuaciones de Newton-Euler para posteriormente implementar las leyes de control y demostrar la estabilidad en lazo cerrado mediante la teoría básica de Lyapunov. Los prototipos son desarrollados con materiales de bajo costo y uso de sistemas embebidos basados en Linux para efectuar los algoritmos de control. La finalidad del desarrollo de estos vehículos es para realizar aplicaciones de exploración y poder operarlos en espacios reducidos, cerrados e irregulares, por mencionar algunas aplicaciones como; el monitoreo en embarcaciones, estudio de ecosistemas en cavernas acuáticas, inspección en estanques de almacenamiento nuclear e instalaciones de tratamiento de agua residual, entre otras.

ABSTRACT

In this thesis, the control problem is addressed by stabilizing the orientation and position of small-scale underwater vehicles (μ AUVs), considering the mechanical design and analysis of dynamical model in order to apply control laws (PID, saturated PD and nonlinear PD), these are validated by simulation and experimental results. The dynamic model of these prototypes is based by the Newton-Euler equations to implement the control laws and demonstrate the stability of closed loop system using the basic Lyapunov theory. The prototypes are developed with low cost materials and embedded systems based on Linux to perform control algorithms. The development of these vehicles is for applications of exploring and navigation in small, closed and irregular spaces, to name a few applications; the monitoring vessels, studying of aquatic ecosystems in caves, ponds inspection at nuclear storage facilities and waste water treatment, among others.

Contenido

Índice de Figuras	VII
1 Introducción	1
1.1 Importancia de la Tesis	3
1.1.1 Planteamiento del Problema	3
1.1.2 Justificación	3
1.2 Motivación	4
1.3 Objetivos	6
1.4 Organización de la Tesis	6
1.5 Estancias de investigación y publicaciones	8
2 Estado del Arte	10
2.1 Breve Historia	10
2.2 Vehículos Submarinos no Tripulados	10
2.2.1 Vehículos ROVs	13
2.2.2 Vehículos AUVs	14
2.2.3 Vehículos IAUVs	15
3 Modelo Matemático de Vehículos Submarinos	17
3.1 Modelo Cinemático de Vehículos Submarinos	20
3.1.1 Matriz de Rotación	20
3.1.2 Descripción de ángulos de Euler	20

3.1.3	Representación en parámetros de Euler	23
3.2	Modelo Dinámico de Vehículos Submarinos	25
3.2.1	Fuerzas Inerciales	26
3.2.2	Fuerzas Hidrodinámicas	29
3.2.3	Masa Agregada	29
3.2.4	Fuerzas de restitución	32
4	Diseño y Modelado de Micro AUVs	34
4.1	Tritón	34
4.1.1	Descripción del Prototipo	34
4.1.2	Modelado Dinámico	36
4.2	Cookie ROV	40
4.2.1	Descripción del Prototipo	41
4.2.2	Modelado dinámico de Cookie ROV	44
4.3	AR2D2	49
4.3.1	Descripción del Prototipo	49
4.3.2	Modelado dinámico de AR2D2	51
5	Control de Micro AUVs	56
5.1	Control PID implementado en Micro AUVs	57
5.1.1	Estrategia de Control	58
5.2	Control PD Saturado	60
5.2.1	Estrategia de Control	60
5.2.2	Análisis de estabilidad	61
5.3	Control PD No Lineal en posición del vehículo AR2D2	65
5.3.1	Estrategia de Control	65
5.3.2	Análisis de Estabilidad	69
6	Simulación y Resultados Experimentales	73
6.1	Resultados del prototipo Tritón	73

<i>CONTENIDO</i>	VI
6.2 Resultados del prototipo Cookie ROV	78
6.2.1 Simulación	78
6.3 Resultados del prototipo AR2D2	83
6.3.1 Simulación	83
7 Conclusiones y Trabajo Futuro	90
Bibliografía	93

Índice de Figuras

1.1	μ AUV desarrollado por DFKI, Bremen.	5
1.2	μ AUV ² desarrollado por DFKI, Bremen.	5
1.3	μ AUV MK VI de la Universidad de Manchester.	5
1.4	μ AUV Ranger desarrollado por Nekton Research.	5
2.1	Dibujo de un vehículo submarino tripulado desarrollado por Leonardo Da Vinci	11
2.2	Robot ALIVE, de Ifremer y Cybernetix, Marsella, Francia.	16
2.3	Robot GIRONA 500, de la Universidad de Girona, España.	16
3.1	Vista de un micro-AUV y sus marcos de referencia (O_I, x_I, y_I, z_I : marco de referencia fijo a la tierra, x_b, y_b, z_b : marco de referencia fijo al cuerpo).	19
3.2	Secuencia de rotación en ángulos de Euler.	21
4.1	Prototipo Tritón.	35
4.2	Diseño CAD del Tritón.	35
4.3	Sistema embebido del robot submarino.	36
4.4	Cookie ROV.	41
4.5	Diseño CAD Cookie ROV.	41
4.6	Arquitectura interna del Prototipo Cookie ROV	42
4.7	Movimiento de rotación en pitch.	43
4.8	Movimiento de rotación en yaw.	43
4.9	Movimientos de traslación.	43

4.10 El prototipo μ AUV Cookie ROV, con su marco de referencia fijo al cuerpo (O_b, x_b, y_b, z_b) , y el marco de referencia fijo a la tierra (O_I, x_I, y_I, z_I) . . .	44
4.11 Fuerzas generadas por los cuatro propulsores del vehículo $f_i \forall i = [1..4]$. CG describe la posición del centro de gravedad.	48
4.12 Prototipo AR2D2.	49
4.13 Diseño CAD AR2D2.	49
4.14 Sistema Embebido del AUV	50
4.15 Vehículo AUV AR2D2, con marco de referencia fijo al cuerpo (O_b, x_b, y_b, z_b) , y marco de referencia fijo a la tierra (O_I, x_I, y_I, z_I)	52
4.16 Fuerzas $f_i \forall i = [1..4]$ generados por los cuatro propulsores del vehículo. CG denota la posición del centro de gravedad.	54
5.1 Controlador PID.	59
5.2 Función de saturación.	66
5.3 Función de saturación variable.	67
6.1 PD sintonizado.	74
6.2 PD con sintonización mejorada.	74
6.3 PID sintonizado.	74
6.4 PID con sintonización mejorada.	74
6.5 PD Saturado sintonizado.	75
6.6 PD Saturado con otra sintonización.	75
6.7 Control PD Saturado en ángulo Yaw.	76
6.8 Entrada de Control U.	76
6.9 PWM en motor 2.	77
6.10 PWM en motor 3.	77
6.11 Control PID en yaw (simulación).	79
6.12 Entrada de control τ_ψ para el control PID.	79
6.13 Control PD en yaw (simulación).	80
6.14 Entrada de control τ_ψ para el control PD.	80

6.15 Control PD saturado en yaw (simulación).	81
6.16 Entrada de control τ_ψ para el control PD saturado.	81
6.17 Sintonización experimental del Control PD (yaw).	82
6.18 Sintonización experimental del Control PID (yaw).	82
6.19 Sintonización experimental del Control PD saturado (yaw).	83
6.20 Modelo Dinámico en simulink.	84
6.21 Control PD no lineal con función de saturación constante en x.	84
6.22 Control PD no lineal con función de saturación constante en z	85
6.23 Entrada de Control U1.	85
6.24 Entrada de Control U2.	86
6.25 Posición en x (avance).	87
6.26 Posición en z (viraje).	87
6.27 Velocidad en el avance.	88
6.28 Velocidad en el viraje.	88
6.29 Posición experimental en x (avance).	89
6.30 Posición experimental en z (viraje).	89

Capítulo 1

Introducción

Desde tiempos ancestrales ha habido un enorme interés de la humanidad en el estudio del universo, los planetas y el sistema solar, así como en la civilización griega, también surgieron varias preguntas y curiosidades de la gente sobre el espacio, seguidas en todos los demás periodos. Hoy vuelan satélites en todas las órbitas para exploración, para la comunicación y la radiodifusión, así como para transmitir información diversa a la tierra. Actualmente ha sido posible la exploración de otros planetas, como Marte, mediante la utilización de robots.

En contraste, los mares y océanos del mundo eran antiguamente utilizados sólo como cursos de agua o como fuente de alimentación. Hoy en día se ha comenzado un intensivo estudio de éstos, dado la búsqueda de nuevas fuentes de energía, así como la investigación en desastres ambientales. Actualmente se están tratando muchas tareas exclusivas con el uso de robots submarinos en la exploración de aguas profundas. Existen diferentes tipos de vehículos submarinos no tripulados, entre ellos se encuentran los vehículos sumergibles operados de forma remota "vehículos teledirigidos (ROV)" y los "vehículos submarinos autónomos (AUV)", los cuales son utilizados en función de la profundidad del mar y de la misión a realizar.

Hay una gran variedad de aplicaciones en el uso de vehículos no tripulados para evitar tareas que ponen en riesgo al ser humano. La correcta operación de estos vehículos

requiere de la convergencia de diferentes disciplinas, entre ellas el control automático juega un rol importante cuando se trata con dinámicas complejas no lineales, como en el caso de los AUVs. Los AUVs han sido utilizados tradicionalmente para investigación oceanográfica en ambientes que pueden ser considerados como infinitamente grandes. De manera que estos vehículos han sido aplicados para tareas de mapeo y monitoreo en áreas localizadas del océano. Algunas misiones como: la inspección en oleoductos, construcción de infraestructura submarina, estudio de arrecifes y monitoreo de ecosistemas en el mundo marino, son aplicaciones que se encuentran en espacios no reducidos.

Existen otras aplicaciones que pueden beneficiarse del uso de AUVs, tal como el monitoreo de estanques de almacenamiento nuclear, instalaciones de tratamiento de aguas residuales y estudio de ecosistemas en cavernas acuáticas. Estos ambientes difieren del océano en relación a sus dimensiones (estos pueden ser considerados como espacios cerrados) y posibles áreas irregulares. Una clave necesaria para monitoreo de procesos en espacios cerrados, es la habilidad de tomar mediciones en lugares específicos. Esto significa que cualquier AUV, que puede ser clasificado como una plataforma sensora, necesita ser capaz de mantener una posición sobre un conjunto de coordenadas 3D determinadas.

Los AUVs tradicionales tienden a ser de gran escala (dimensión en metros) y alto costo, haciendo estos inadecuados para ambientes de pequeña escala. Un interesante tema, en el punto de vista de control automático; es que muy comúnmente los movimientos en el plano horizontal y vertical se encuentran acoplados, es decir, para el impulso de avance se requiere mover el vehículo en el plano vertical. Esto significa que los diseños de AUVs tradicionales son inapropiados para ser usados como plataformas sensoras de pequeña escala. Las principales características de los micro vehículos, con respecto a vehículos tradicionales, son su tamaño y su maniobrabilidad.

1.1 Importancia de la Tesis

En este trabajo de tesis se aborda el problema de control en regulación para la orientación y posición de vehículos submarinos de pequeña escala (μ AUVs), con la finalidad de operarlos en espacios reducidos, cerrados e irregulares, para realizar tareas de inspección en estanques de almacenamiento nuclear, en instalaciones de tratamiento de agua residual, monitoreo en embarcaciones, estudio de ecosistemas en cavernas acuáticas, entre otras. Son considerados Micro AUVs cuando éstos no rebasan los 5 kg, sus dimensiones no sobre pasan los metros de longitud y su capacidad de inmersión es del orden de 50 metros, comúnmente se diseñan para utilizarse como plataformas sensoras dependientes del tiempo. Actualmente se están desarrollando algoritmos para realizar tareas de colaboración con estos vehículos mediante el uso de dispositivos acústicos.

En México existe un gran campo de aplicación para el uso de estos vehículos, principalmente en aplicaciones de exploración, así como en sus mares, lagos, lagunas y cenotes, donde está surgiendo el interés por descubrir la gran riqueza de recursos naturales inmersos en las aguas del país.

1.1.1 Planteamiento del Problema

Se requiere desarrollar vehículos submarinos de pequeña escala para realizar aplicaciones de control en regulación (orientación y posición) para monitoreo e inspección en espacios cerrados y de difícil acceso.

1.1.2 Justificación

Para desarrollar estos micro vehículos, se requiere de la convergencia en investigación de los temas relacionados con el diseño, modelado y control de robots submarinos, siendo éste un proyecto multidisciplinario de una de las áreas de la robótica, en donde es de suma importancia los roles que juegan la mecánica, la electrónica e informática para cumplir con los objetivos que se proponen y dar una propuesta de solución viable.

1.2 Motivación

El interés por desarrollar sistemas cada vez más compactos y diminutos ha dado lugar a la robótica una gran diversidad de aplicaciones, tales como en la medicina y en la ingeniería. Donde se busca solucionar problemas que requieren de gran precisión y de difícil manejo para el ser humano. En contexto es aquí en donde la robótica submarina entra en juego, teniendo una numerosa demanda por solucionar problemas que requieren el desarrollo de vehículos de muy pequeña escala para aplicaciones de monitoreo ó manipulación.

Después del desastre del Golfo de México en 2010 con las fugas de hidrocarburos en oleoductos, han surgido diversas iniciativas para desarrollar tecnologías para la limpieza de futuros derrames. Aunque la mayoría de ellas, como las nanoesponjas o los robots autónomos están todavía en fase de desarrollo. Si bien, una de las dificultades que hubo al enviar el AUV RU27 (Caballero escarlata) tipo glider para el estudio de fugas de petróleo, fue que éste no podía acceder en espacios cerrados y estrechos entre los oleoductos.

El desarrollo de micro AUVs (del inglés; Micro Autonomous Underwater Vehicles) actualmente está muy restringido, por mencionar algunos, se tiene: el prototipo *MK VI* (ver figura 1.3) desarrollado por investigadores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Manchester (ver [1] y [2]), donde surgen aplicaciones de monitoreo para estanques de almacenamiento nuclear, además de utilizar estos vehículos en colaboración con otros AUVs.

En la Universidad de Bremen han desarrollado un par de $\mu AUVs$ (ver [3] y [4]), el primer vehículo que se diseñó (ver figura 1.1), tiene la característica de ser un vehículo muy compacto y completamente actuado con cinco propulsores, también éste ha servido para realizar tareas de monitoreo para espacios reducidos en cavernas acuáticas con una profundidad de 10 m. Mientras que el prototipo μAUV^2 (ver figura 1.2), es una versión mejorada del primero, siendo éste subactuado.

Existe otro micro vehículo tipo glider que se le conoce como *Ranger μ AUV* (ver [5]), este prototipo se muestra en la imagen 1.4, el cual es producido por Nekton Research, está diseñado para operar hasta 100 m de profundidad para tareas de inspección, además de tener la característica de comunicarse con otros vehículos similares para realizar tareas de cooperación.



Figura 1.1: μ AUV desarrollado por DFKI, Bremen.

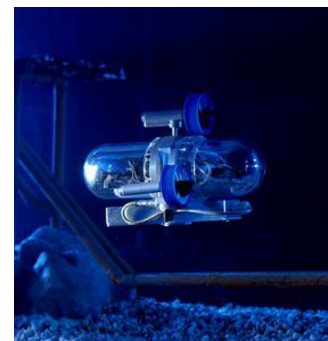


Figura 1.2: μ AUV² desarrollado por DFKI, Bremen.



Figura 1.3: μ AUV MK VI de la Universidad de Manchester.



Figura 1.4: μ AUV Ranger desarrollado por Nekton Research.

Aunque no hay un tamaño estandarizado para el desarrollo de estos pequeños vehículos, éstos no deben exceder los 5 kg, ni sus dimensiones en metros (ver [10]), por lo general estos vehículos son desarrollados para tareas de monitoreo y cooperación en espacios reducidos ó de difícil acceso para vehículos de mayor escala.

En el laboratorio UMI LAFMIA (Laboratorio Franco Mexicano de Informática y Automática de la Unidad Mixta Internacional) del Cinvestav, el equipo de trabajo de mini submarinos tiene la tarea de desarrollar prototipos sumergibles no tripulados, para abordar diferentes problemas de control automático aplicado a estos vehículos, tales como problemas de regulación y de seguimiento, cuya finalidad consiste en realizar aplicaciones en campo, como son; misiones de búsqueda, inspección y colaboración. De tal manera que con este trabajo de tesis, se contribuye en un aporte más para esta área de investigación, con el desarrollo de micro vehículos que permitan realizar diversas aplicaciones del control automático.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Realizar el modelado, diseño y control en orientación y posición de vehículos submarinos autónomos de pequeña escala (μ AUVs). De tal forma que los objetivos específicos son los siguientes:

- Diseñar micro submarinos.
- Realizar el modelado dinámico de los μ AUVs.
- Implementar estrategias de control en los μ AUVs.
- Realizar posicionamiento mediante un sistema acústico.

1.4 Organización de la Tesis

Este trabajo de tesis está desarrollado en siete capítulos, manteniéndolo de forma secuencial lo teórico con lo experimental. En el capítulo 2, se presenta la información de auge que engloba el tema sin perder de vista los datos trascendentales en el desarrollo de esta tecnología.

Con respecto al capítulo 3 se presentan los fundamentos matemáticos sobre el modelado de robots submarinos. En la sección de modelado cinemático se explican brevemente las convenciones para describir el movimiento de los robots. Mientras que en la sección de modelado dinámico se muestra de forma concreta la derivación de las ecuaciones de movimiento.

En el capítulo 4 se presenta el diseño y modelado de los prototipos micro submarinos desarrollados en el laboratorio, tomando en cuenta desde la arquitectura interna que contiene; los sistemas de sensado, embebido y de potencia como se muestra en la primera sección correspondiente de cada vehículo. De tal manera que en las siguientes secciones se presentan más detalles sobre el diseño y capacidades de estos vehículos con su respectivo modelo dinámico.

En el capítulo 5 se detallan las leyes de control aplicadas (PID, PD y PD Saturado) para la orientación del vehículo Tritón y Cookie ROV con la finalidad de comparar éstas y seleccionar la más idónea para cada vehículo, mientras que para el caso del vehículo AR2D2, se ha implementado una ley de control PD no lineal en el control de avance y profundidad.

En el capítulo 6 se muestran las gráficas de resultados de simulación y experimentales de las leyes de control implementadas en los prototipos Cookie ROV y AR2D2, mientras que en el prototipo Tritón sólo se presentan los gráficos de resultados experimentales obtenidos de la mejor sintonización del controlador aplicado.

Finalmente en el capítulo 7 se presentan las conclusiones sobre el trabajo realizado, tomando en cuenta las fortalezas y debilidades en el desarrollo de micro AUVs para aplicaciones de control en orientación y posición, además de los dilemas que se deben resolver como trabajo futuro.

1.5 Estancias de investigación y publicaciones

Durante mis estudios de doctorado, se participó en varios concursos relacionados con el desarrollo de vehículos submarinos autónomos, además de algunas publicaciones en congresos.

Estancias en el extranjero:

- ENSTA - École Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne, Brest Francia (de junio a julio 2013 y de agosto a octubre 2014).
- Participación en el concurso de vehículos submarinos autónomos SAUC-E (Student Autonomous Underwater Vehicle Challenge Europe), julio 2013 y septiembre 2014 en la Spezia, Italia.
- Participación en el concurso de vehículos submarinos autónomos eu-Rathlon, octubre 2014 en la Spezia, Italia.

Publicaciones en Congresos:

- Jesus A. Monroy, Eduardo Campos, Jorge A. Torres. *Control en orientación de un micro vehículo submarino mediante un sistema embebido*. III Congreso Internacional de Robótica y Computación, marzo 2016.
- Cyril Rouviere, Elba Antonio, Jesus A. Monroy, Eduardo Campos, Jorge A. Torres. *Implementing Basic Computer Vision for LIRMIA III Autonomous Underwater Vehicle*. Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías, septiembre 2015.
- Jesus A. Monroy, Eduardo Campos, Jorge A. Torres. *Nonlinear PD control based for depth and forward movements of a Micro-AUV*. II Congreso Internacional de Robótica y Computación, abril 2015.
- Eduardo Campos, Fred Comby, Vincent Creuze, Jorge Torres, Elba Antonio, Olivier Strauss, J. Monroy. *AUV pipeline following by artificial vision*. II Congreso Internacional de Robótica y Computación, agosto 2015.

Artículos sometidos en revista internacional:

- Jesús A. Monroy, Eduardo Campos, Jorge A. Torres. *In extenso: Attitude Control of a Micro AUV through an Embedded System*. Revista del IEEE América Latina.
- Jesús A. Monroy, Eduardo Campos, Jorge A. Torres. *In extenso: Nonlinear PD Control for Heave and Surge movements of a Micro Autonomous Underwater Vehicle*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial.

Para someter en revista internacional:

- Eduardo Campos, Jesús A. Monroy, Adrián Manzanilla, Jorge A. Torres. *AUV Pipeline following with a nonlinear PD Controller by artificial vision*.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Breve Historia

En la siguiente figura se presenta un dibujo de uno de los primeros vehículos submarinos tripulados. Fue encontrado en el Códice Atlántico (Codex Atlanticus), escrita por Leonardo Da Vinci entre 1480 y 1518 junto con el desarrollo de algunos dispositivos de buceo. Las leyendas dicen que Leonardo trabajó en la idea de una máquina militar bajo el agua que más tarde destruyó por sí mismo porque los resultados a su juicio parecieron demasiado peligrosos. Tal vez surgió la primera idea de un mecanismo sumergible por Aristóteles; siguiendo la leyenda que él construyó una máquina: *skaphe andros*, un bote sumergible que permitió a Alejandro Magno quedarse en la profundidad por lo menos la mitad de un día durante la Guerra de Tiro en el 325 a.C. Esto es irreal, por supuesto, también considerando que la ley de Arquímedes no llegaba a ser aún realidad (alrededor del 250 a.C.)

2.2 Vehículos Submarinos no Tripulados

La Robótica Submarina se ha conocido en los últimos años por su creciente interés en la investigación y la industria. Actualmente, es común el uso de submarinos no tripulados ROV para llevar a cabo misiones en el fondo del mar e inspección de tuberías, manteni-

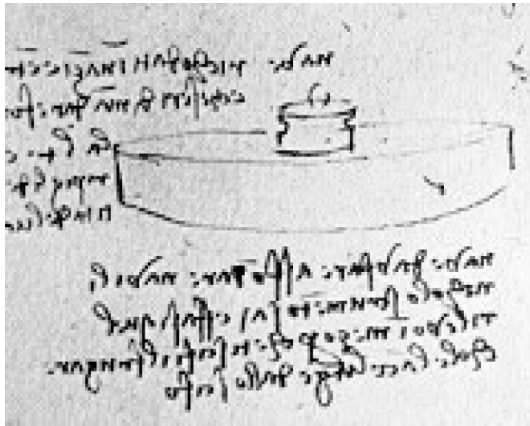


Figura 2.1: Dibujo de un vehículo submarino tripulado desarrollado por Leonardo Da Vinci

miento de cableado, vigilancia, mantenimiento de estructuras y estudio de ecosistemas en el mundo marino. La fuerte limitante de la utilización de vehículos no tripulados, es el enorme costo y el riesgo de trabajar en un ambiente tan hostil. El objetivo de la investigación es realizar tales misiones de una manera completamente autónoma.

Conseguir la autonomía, es el objetivo desafiante de la tecnología, así como de los aspectos teóricos, ya que implica una amplia gama de técnicas e investigación de tópicos relacionados. El envío de un vehículo autónomo en un entorno desconocido y no estructurado, con limitada comunicación en línea, requiere de inteligencia a bordo y la capacidad del vehículo para reaccionar de una manera confiable a situaciones inesperadas. Algunas técnicas utilizan la inteligencia artificial, el control convencional, redes neuronales y la lógica difusa que puede ser útil en misiones de control de alto nivel. El sistema sensorial del vehículo debe hacer frente a un ambiente ruidoso y no estructurado; por otra parte, se tienen tecnologías GPS que no son aplicables debido a la imposibilidad de transmisión electromagnética bajo el agua; los sistemas basados en la visión no son plenamente fiables debido a la mala visibilidad. El sistema de accionamiento es por lo general compuesto por propulsores y superficies de control; todos estos tienen una

dinámica no lineal y se ven afectados fuertemente por los efectos hidrodinámicos.

Un robot submarino está diseñado para realizar tareas bajo el agua, las cuales pueden ser realizadas mientras navega o al llegar a un lugar prefijado mediante algún tipo de manipulador. Desde este punto de vista, los robots submarinos pueden hacer dos tipos de misiones:

Tareas de Inspección

Son aquellas misiones que se realizan durante la navegación del robot submarino. En este tipo de tareas no se requiere un brazo manipulador, ni mecanismos para interactuar con el ambiente. Una misión de inspección consistiría en almacenar imágenes con una o varias cámaras mientras el robot navega en el agua. Por otro lado, la observación del ecosistema marino mediante la obtención de la cartografía acústica o en la obtención de datos relativos a la calidad del agua donde navega. Además, dentro de las misiones de inspección se encuentra la revisión de instalaciones submarinas, así como la inspección de oleoductos y estructuras metálicas.

Tareas de Manipulación

Son aquellas misiones en las que el robot submarino requiere de brazos manipuladores y/o herramientas. Para el desarrollo de estas tareas se deberá contar con un sistema de visión en tiempo real (en el caso de ROVs), que proporcione al operador las imágenes en directo del entorno de operación. Las tareas típicas de manipulación comprenden: el mantenimiento de estructuras subacuáticas; la apertura y cierre de válvulas en instalaciones submarinas; la desactivación de minas; el ensamble y desensamble de componentes; la recolección de muestras para estudios arqueológicos, geológicos o ecológicos; la intervención en desastres para controlar las fugas de material contaminante o ayudar en el rescate de personas.

Los robots submarinos se clasifican principalmente por su nivel de autonomía. Existen robots completamente autónomos y otros que deben ser controlados continuamente por un operador, estos son los AUVs y los ROVs, respectivamente. Por otro lado se encuentran los IAUVs que pueden considerarse actualmente en un nivel intermedio de autonomía, ya que los prototipos desarrollados hasta ahora, cuentan con un nivel de

control supervisado o de un operador que realice la tarea de razonamiento para determinar las acciones que se deben llevar a cabo para completar la misión. No obstante, el objetivo final de estos robots es que lleguen a ser completamente autónomos y sólo sea el operador el que al inicio defina la misión a realizar mediante comandos de alto nivel. Estos robots se pueden clasificar por el tipo de misión a realizar. Las misiones pueden ser de inspección (u observación) o de manipulación (o intervención). La principal diferencia entre un robot diseñado para realizar intervenciones y otro que sólo realiza inspecciones, es que el primero debe poseer herramientas y/o un brazo robótico. La misión para la que está diseñado un robot submarino definirá el tipo de sensores, procesadores y actuadores.

El sistema de propulsión de un robot submarino define completamente el tipo de movimientos y maniobras que éste puede realizar. Los sistemas de propulsión también tienen implicaciones en el consumo de energía, el hardware del robot, y el efecto que el robot genera en el ambiente marino. Los principales sistemas de propulsión son los impulsores de hélice, los planeadores acuáticos (basados en sistemas de lastre y aletas), y los bioinspirados. En fase experimental o cuya tecnología no se ha madurado completamente están los basados en inyección de agua y los magneto-hidrodinámicos.

2.2.1 Vehículos ROVs

Los robots submarinos operados remotamente ROVs (Remotely Operated Vehicle) están conectados a la superficie mediante un cordón umbilical (un conjunto de cables unidos), el cual permite el intercambio de información y la alimentación de energía al robot. A través de una interface gráfica del ordenador situado en la superficie, el usuario define los comandos que el robot deberá ejecutar. A su vez el robot envía las señales de sus sensores (presión, temperatura, imágenes, etc.) al ordenador en superficie, para que el usuario conozca el estado del robot y el ambiente que lo rodea.

Actualmente a las instalaciones petroleras o de gas se les presta servicio mediante ROVs. La demanda del trabajo realizado en estructuras submarinas es alta, ya que requieren de inspección frecuente e intervención para realizar las operaciones de perforación, manipulación de válvulas, reparar o reemplazar componentes submarinos, y realizar una gran variedad de tareas requeridas para mantener el ritmo de producción y la calidad del producto. La tendencia en el uso de ROVs aumentará a medida que la producción de gas y petróleo en instalaciones cerca de la costa se traslade hacia aguas profundas.

Las tareas de este tipo de robots se vuelven más complejas cuando se realizan a mayores profundidades. Debido al aumento de la cantidad de datos y señales de control a transferir a través del cordón umbilical, los cables aumentan su diámetro, lo cual hace que el vehículo sea menos manejable, ya que las fuerzas de arrastre del agua son mayores. No obstante, se han presentado algunas soluciones como construir un sistema de manejo de cable (TMS, por las siglas en inglés Theter Management System) el cual se ancla en el fondo marino y soporta las fuerzas de arrastre del cable de mayor distancia (el que va desde la embarcación en la superficie al TMS) y a la vez permite que el ROV navegue con mayor facilidad.

2.2.2 Vehículos AUVs

Los robots submarinos autónomos AUVs (Autonomous Underwater Vehicle) poseen una arquitectura de control que les permite realizar misiones sin la supervisión de un operador. Además contienen su propia fuente de energía, generalmente basada en baterías recargables.

Por lo general no hay una línea de comunicación entre el vehículo y la superficie, ya que se le suele programar con tareas y misiones predefinidas. Sin embargo, cuando se requiere un intercambio de información con la superficie, la comunicación puede realizarse a través de dispositivos acústicos.

Estos robots pueden resolver las limitaciones impuestas por los cables de los ROVs para algunas tareas. Los AUVs se utilizan actualmente para tareas de exploración científica, muestreo oceanográfico, arqueología submarina y exploración debajo del hielo. Los datos que recopila el vehículo se almacenan en su memoria interna para luego ser analizados.

Por otro lado, también se han utilizado para operaciones militares, como lo son la detección de minas, y se están desarrollando aplicaciones más elaboradas como lo son en vigilancia submarina.

2.2.3 Vehículos IAUVs

Los AUVs han sido diseñados para realizar misiones de observación, sin embargo, recientemente se ha generado un interés en que estos pueden realizar tareas de manipulación. Esta es la idea detrás de los robots submarinos autónomos para intervención (IAUVs, por sus siglas en inglés). Con este tipo de robots las misiones serían más económicas que en el caso de los ROVs, además de su maniobrabilidad sería superior ya que el IAUV estaría libre de las restricciones que impone el cordón umbilical. Por ejemplo el vehículo ALIVE (ver imagen 2.2) navega autónomamente hasta el lugar donde se realizará la intervención, una vez que llega a la posición deseada cambia su operación a control supervisado y mediante comunicación acústica realiza las tareas de manipulación. Por su parte el robot GIRONA 500 (del proyecto RAUVI) explora primero la región de interés y toma información acústica y visual del fondo marino. Posteriormente el robot sube a la superficie donde la información recolectada es procesada para realizar una reconstrucción de la región explorada. A través de una interface gráfica de usuario un operador identifica el objeto de interés y dá los comandos al robot para que realice la intervención (ver imagen 2.3).



Figura 2.2: Robot ALIVE, de Ifremer y Cybernetix, Marsella, Francia.

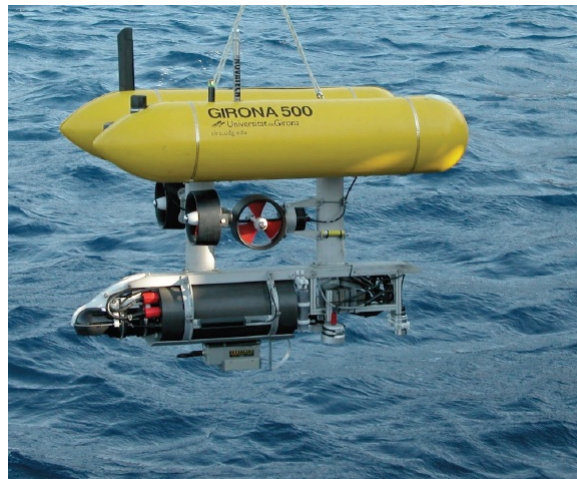


Figura 2.3: Robot GIRONA 500, de la Universidad de Girona, España.

Capítulo 3

Modelo Matemático de Vehículos Submarinos

En este capítulo se presentan los fundamentos matemáticos para el modelado de vehículos submarinos. Se explican de forma breve las convenciones para la descripción del movimiento en estos vehículos. Por una parte, el modelado cinemático consiste de las ecuaciones que relacionan los diferentes marcos de referencia utilizados para expresar la velocidad del vehículo. Por otra parte, en el modelado dinámico se describen las fuerzas que actúan sobre el AUV cuando este navega.

Al analizar el movimiento de un robot submarino, se requiere definir dos marcos de referencia para representar su movimiento, estos son:

Marco de Referencia Inercial (NED).

Este marco debe ubicarse sobre la superficie de la tierra y su nombre indica las siglas en inglés de Norte-Este-Abajo (North-East-Down). Al representar este marco el eje x se dirige hacia el norte, el eje y hacia el este, y el eje z hacia el centro gravitacional de la tierra. De manera que I representa el marco de referencia inercial.

Marco de Referencia del cuerpo B .

Este marco de referencia se encuentra fijo al cuerpo del robot. Las velocidades lineales y

angulares se expresan comúnmente en el marco de referencia del cuerpo. El origen O_B de este marco de referencia frecuentemente se hace coincidir con el centro de gravitatorio del cuerpo. Los ejes de este marco generalmente se eligen de tal forma que coincidan con los ejes principales de inercia. Generalmente x_b es el eje longitudinal, y_b es el eje transversal y z_b que va normal a la superficie de la tierra.

Para la robótica submarina y navegación marítima hay una convención (SNAME, ver [22]) para expresar la orientación, la posición del vehículo y las fuerzas que intervienen sobre él, ver tabla 3.

A continuación se presenta el análisis de la formulación descrita en [18] y en [7] sobre el modelado de cuerpos rígidos.

Para representar la posición del vehículo con respecto al marco inercial se tiene el vector:

$$\eta = \begin{bmatrix} r_o^n \\ \Theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde $r_o^n = [x, y, z]^T$ representa la posición del marco de referencia del cuerpo B con respecto al marco I , mientras que Θ es un vector de parámetros que permite definir la orientación relativa entre estos dos marcos de referencia. En este caso, los parámetros de orientación pueden ser los ángulos de Euler ó el cuaternión de los parámetros de Euler p_b .

La velocidad del vehículo se representa por el vector:

$$\nu = \begin{bmatrix} v_o^b \\ w_b^b \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

donde $v_o^b = [u, v, w]^T$ es la velocidad lineal del vehículo en coordenadas del marco del cuerpo B , mientras que $w_b^b = [p, q, r]^T$ representa la velocidad angular del cuerpo con respecto al marco inercial medido en el marco de referencia del cuerpo B . Estas velocidades también suelen denotarse por los vectores $\nu_1 = v_o^b$ y $\nu_2 = w_b^b$.

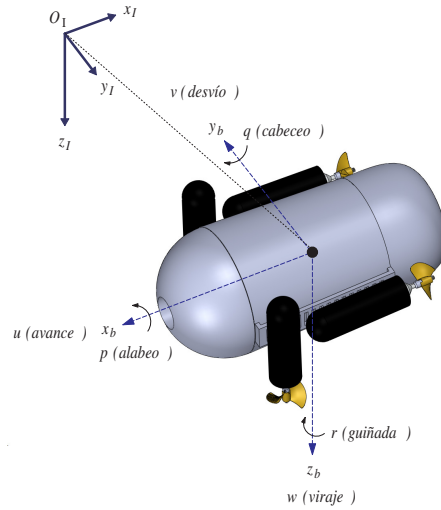


Figura 3.1: Vista de un micro-AUV y sus marcos de referencia (O_I, x_I, y_I, z_I : marco de referencia fijo a la tierra, x_b, y_b, z_b : marco de referencia fijo al cuerpo).

Movimiento	Fuerzas y Momentos	Velocidad lineal y angular	Posición lineal y angular	Español	Inglés
Traslación en x	X	u	x	Avance	Surge
Traslación en y	Y	v	y	Desvío	Sway
Traslación en z	Z	w	z	Viraje	Heave
Rotación en x	K	p	ϕ	Alabeo	Roll
Rotación en y	M	q	θ	Cabeceo	Pitch
Rotación en z	N	r	ψ	Guiñada	Yaw

Cuadro 3.1: Notación utilizada por la SNAME para vehículos submarinos.

Para describir las fuerzas a las que está sujeto el vehículo se utiliza la notación:

$$\tau = \begin{bmatrix} f_o^b \\ n_o^b \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

donde $f_o^b = [X, Y, Z]^T$ y $n_o^b = [K, M, N]^T$ son los vectores de fuerzas y momentos ejercidos sobre el cuerpo, medidos en el marco de referencia del cuerpo B .

3.1 Modelo Cinemático de Vehículos Submarinos

3.1.1 Matriz de Rotación

Mediante el uso del álgebra matricial, las matrices de rotación son el método más extendido para la descripción de orientaciones. Estas matrices permiten representar la orientación que existe entre dos sistemas de coordenadas.

Dado un vector r^b expresado en coordenadas del marco referencial B , entonces este mismo vector, expresado en coordenadas del marco de referencia I está dado por:

$$r^a = R_b^a r^b.$$

Sean A , B y C tres marcos coordenados. Si R_b^a es la matriz de rotación de B a A y R_c^b es la matriz de rotación de C a B , entonces la matriz de rotación de C a A está dada por: $R_c^a = R_b^a R_c^b$ que define la regla de composición para rotaciones. Finalmente, se denomina matriz de rotación elemental a la matriz de rotación que representa una rotación alrededor de uno de los ejes del marco de referencia.

3.1.2 Descripción de ángulos de Euler

De acuerdo a Euler, sean dos marcos coordenados ortonormales independientes (con un origen común) pueden ser relacionados por una sucesión de no más de tres rotaciones alrededor de los ejes coordenados. Esto significa que si se conoce la secuencia de ejes a rotar, se necesitan sólo tres ángulos de Euler para definir completamente la rotación total.

Dada una secuencia de ángulos de Euler, será posible encontrar la matriz de rotación correspondiente. La convención utilizada en robótica submarina para ángulos de Euler consiste de la siguiente sucesión:

- Rotación del marco de referencia de un ángulo ψ alrededor del eje z para obtener el marco B_1 .

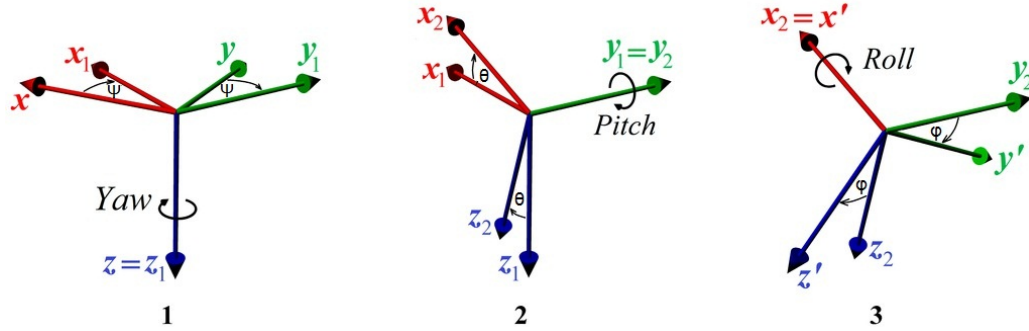


Figura 3.2: Secuencia de rotación en ángulos de Euler.

- Rotación del marco de referencia de un ángulo θ alrededor del eje y para obtener el marco B_2 .
- Rotación del marco de referencia de un ángulo ϕ alrededor del eje x para obtener el marco B' .

De esta forma:

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

donde $s \cdot = \sin(\cdot)$ y $c \cdot = \cos(\cdot)$.

El orden de estas rotaciones no es arbitrario. Estas rotaciones se llevan a cabo desde el marco de referencia I al marco B . Esta matriz se denota por $R_n^b = R_b^{nT}$. La matriz transpuesta implica que el mismo resultado se obtiene de transformar un vector del marco de referencia B al marco I , invirtiendo el orden de rotación. Esta secuencia de rotaciones es matemáticamente equivalente a:

$$R_b^n = R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi} \quad (3.5)$$

Realizando esta operación se obtiene:

$$R_b^n = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Para efectuar la operación inversa, esto es, determinar los ángulos de euler una vez conocida la matriz de rotación, se pueden derivar las siguientes expresiones:

$$\phi = \arctan 2(r_{32}, r_{33}) \quad (3.7)$$

$$\theta = -\sin^{-1}(r_{31}) = -\tan^{-1}\left(\frac{r_{31}}{\sqrt{1-r_{31}^2}}\right) \quad (3.8)$$

$$\psi = \arctan 2(r_{21}, r_{11}) \quad (3.9)$$

en donde r_{ij} denota el elemento (i,j) de la matriz de rotación R_b^n , y $\arctan 2(y, x)$ es la función arco tangente de dos argumentos reales x, y , y satisface que $\frac{\pi}{2} \leq \arctan 2 \leq \frac{\pi}{2}$.

Representación de la transformación de Velocidades

La transformación que relaciona el vector de velocidad lineal en un marco de referencia inercial al marco de referencia del cuerpo, puede ser deducida de la siguiente forma:

$$\dot{\mathbf{r}}_o^b = \mathbf{R}_b^n \mathbf{v}_o^b \quad (3.10)$$

El vector de velocidad angular del cuerpo ω_b^b y el vector de velocidad de los ángulos de Euler están relacionados mediante una matriz de transformación \mathbf{T}_θ tal y como se muestra a continuación:

$$\dot{\Theta} = \mathbf{T}_\theta \omega_b^b \quad (3.11)$$

donde \mathbf{T}_θ está dada por:

$$\mathbf{T}_\theta = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

y $t \cdot = \tan(\cdot)$.

Las ecuaciones anteriores pueden resumirse de la siguiente forma:

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}\nu \quad (3.13)$$

donde:

$$\mathbf{J}(\nu) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^n & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_\theta \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

donde $\dot{\eta} = \frac{d(\eta)}{dt}$.

3.1.3 Representación en parámetros de Euler

Otra alternativa para representar la orientación es mediante parámetros de Euler. La razón de utilizar estos parámetros es evitar las singularidades que sufre dicha representación.

Un cuaternión está compuesto de cuatro parámetros:

$$\mathbf{p} = [e_0 \ e_1 \ e_2 \ e_3]^T \quad (3.15)$$

que satisfacen una restricción de norma unitaria,

$$\mathbf{p}^T \mathbf{p} = 1 \quad (3.16)$$

La expresión de la matriz de rotación en términos de los parámetros de Euler es la siguiente:

$$\mathbf{R}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} 1 - 2(e_2^2 + e_3^2) & 2(e_1e_2 - e_0e_3) & 2(e_1e_3 + e_0e_2) \\ 2(e_1e_2 + e_0e_3) & 1 - 2(e_1^2 + e_3^2) & 2(e_2e_3 - e_0e_1) \\ 2(e_1e_3 - e_0e_2) & 2(e_2e_3 + e_0e_1) & 1 - 2(e_1^2 + e_2^2) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

En forma compacta, se tiene:

$$\mathbf{R} = (e_0^2 - \mathbf{e}^T \mathbf{e}) \mathbf{I}_3 + 2e_0 \mathbf{S}(\mathbf{e}) + 2\mathbf{e}\mathbf{e}^T \quad (3.18)$$

o equivalentemente

$$\mathbf{R} = \mathbf{I}_3 + 2e_0 \mathbf{S}(\mathbf{e}) + 2\mathbf{S}(\mathbf{e})^2 \quad (3.19)$$

donde $\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ es un subvector de \mathbf{p} y $S(\cdot)$ es el operador matricial del producto cruz. Dado el vector \mathbf{e} se tiene que:

$$\mathbf{S}(\mathbf{e}) = \begin{bmatrix} 0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & 0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Transformación de velocidades

Para realizar la transformación de velocidades lineales se realiza la misma operación que en el caso de los ángulos de Euler, simplemente mediante el uso de la matriz de rotación.

La transformación de la velocidad angular se puede derivar sustituyendo la expresión (3.17) en la ecuación diferencial $\dot{\mathbf{R}}_b^n = \mathbf{R}_b^n \mathbf{S}(\omega_b^b)$. Mediante algunas operaciones se tiene:

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{T}_p \omega_b^b \quad (3.21)$$

donde:

$$\mathbf{T}_p(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -e_1 & -e_2 & -e_3 \\ e_0 & -e_3 & e_2 \\ e_3 & e_0 & -e_1 \\ -e_2 & e_1 & e_0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Las expresiones anteriores se pueden resumir de la siguiente manera:

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}\nu \quad (3.23)$$

donde:

$$\mathbf{J}(\nu) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_b^n & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_p \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

En este caso $\dot{\eta} = [\dot{\mathbf{r}}_o^n \quad \dot{\mathbf{q}}]^T$.

3.2 Modelo Dinámico de Vehículos Submarinos

Para representar el modelo dinámico de un vehículo submarino, debe describirse la relación que hay entre los movimientos del robot y las fuerzas que se ejercen sobre el mismo. A continuación se muestra una revisión a la formulación presentada en [18] sobre el modelado de cuerpos sumergidos. De esta forma, es posible calcular las fuerzas externas necesarias para que el robot se mueva de una forma determinada, ó por el contrario, se puede deducir el movimiento generado por las fuerzas externas a las que el robot está sujeto.

En esta sección se hace uso de la representación de Newton-Euler para cuerpos sumergidos en un fluido. De tal manera que los cuerpos sumergidos están sujetos a diferentes tipos de fuerzas. Estas fuerzas son principalmente las fuerzas inerciales, las hidrodinámicas y las fuerzas de restitución.

El modelo dinámico de un vehículo submarino puede escribirse en su forma compacta como se muestra a continuación:

$$\mathbf{M}\dot{\nu} + \mathbf{C}(\nu)\nu + \mathbf{D}(\nu)\nu + \mathbf{g}(\eta) = \tau + w \quad (3.25)$$

$$\tau = \mathbf{B}_t \mathbf{u}_t \quad (3.26)$$

La matriz \mathbf{M} contiene los elementos de la matriz de inercia y la matriz de masa agregada.

La matriz \mathbf{C} consiste de la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis del cuerpo rígido y de la masa agregada.

La matriz \mathbf{D} es la matriz de fuerzas viscosas y parámetros hidrodinámicos.

El vector $\mathbf{g}(\eta)$ representa las fuerzas de restitución (las cuales están compuestas por la fuerza de gravedad y la fuerza de flotabilidad).

El vector τ representa las fuerzas que ejercen los propulsores (ó cualquier otro elemento generador de fuerza) sobre el robot submarino. Los elementos de la matriz de control \mathbf{B}_t dependen de la configuración de cada robot, sus superficies de control, el número de propulsores, y la ubicación y orientación de los propulsores. El vector \mathbf{u}_t está compuesto por las fuerzas que se generan en cada propulsor.

El vector w representa las perturbaciones del ambiente (como lo son; las olas, el viento, y las corrientes marinas).

3.2.1 Fuerzas Inerciales

Las ecuaciones de Newton-Euler para un cuerpo rígido son las siguientes:

$$\mathbf{f}_c^b = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v}_c^b) \quad (3.27)$$

$$\mathbf{n}_c^b = \frac{d}{dt}(\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}_b^b) \quad (3.28)$$

donde \mathbf{f}_c^b y \mathbf{n}_c^b son la fuerza y el torque en el centro de masa del cuerpo; m e \mathbf{I} son la masa y la matriz de inercia del cuerpo, respectivamente. En este caso la matriz de masa está dada en el marco de referencia del cuerpo. Los vectores \mathbf{v}_c^b y ω_b^b representan la velocidad lineal y angular del cuerpo con respecto al marco de referencia inercial I pero medidas en el marco de referencia del cuerpo B .

Para robots submarinos, es deseable derivar las ecuaciones de movimiento dada una posición arbitraria del origen O_B del marco de referencia del cuerpo B . Esto se debe a que algunas propiedades hidrodinámicas se pueden calcular con mayor facilidad en puntos que pueden no coincidir con el centro de masa del robot.

La velocidad lineal del centro de masa con respecto al marco I medido en el marco de referencia del cuerpo B se puede expresar de la siguiente manera:

$$\mathbf{v}_c^b = \mathbf{v}_o^b + \omega_b^b \times \mathbf{r}_g^b \quad (3.29)$$

donde \mathbf{r}_g^b es la posición del centro de masa con respecto al origen del marco B . Para determinar la aceleración del centro de masa con respecto al marco de referencia I se considera primero que $\mathbf{v}_c^n = \mathbf{R}_b^n \mathbf{v}_c^b = \mathbf{R}_b^n (\mathbf{v}_o^b + \omega_b^b \times \mathbf{r}_g^b)$. Derivando \mathbf{v}_c^n con respecto al tiempo se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{\mathbf{v}}_c^n = \mathbf{R}_b^n [\dot{\mathbf{v}}_o^b + \dot{\omega}_b^b \times \mathbf{r}_g^b + \omega_b^b \times \mathbf{v}_o^b + \omega_b^b \times (\omega_b^b \times \mathbf{r}_g^b)] \quad (3.30)$$

Por lo tanto, sustituyendo el valor de la derivada 3.30 en la ecuación 3.27, y dado que $\mathbf{f}_o^b = \mathbf{f}_c^b$ para movimientos traslacionales obtenemos la siguiente expresión:

$$\mathbf{f}_o^b = m [\dot{\mathbf{v}}_o^b + \dot{\omega}_b^b \times \mathbf{r}_g^b + \omega_b^b \times \mathbf{v}_o^b + \omega_b^b \times (\omega_b^b \times \mathbf{r}_g^b)] \quad (3.31)$$

lo cual nos permite calcular la fuerza en el origen del marco de referencia del cuerpo, es decir O_B .

Por otra parte el momento angular con respecto al punto O_B y al punto C está dado por las siguientes expresiones $\mathbf{h}_o^b = \mathbf{I}_o \omega_b^b + m \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{v}_o^b$ y $\mathbf{h}_c^b = \mathbf{h}_o^b - m \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{v}_c^b$.

Considerando que $\mathbf{h}_c^n = \mathbf{R}_b^n \mathbf{h}_c^b$, la derivada temporal del momento angular con respecto al punto C es la siguiente:

$$\dot{\mathbf{h}}_c^n = \mathbf{R}_b^n [\mathbf{I}_o \dot{\omega}_b^b + m \mathbf{r}_g^b \times (\dot{\mathbf{v}}_o^b - \dot{\mathbf{v}}_c^b) + \omega_b^b \times (\mathbf{I}_o \omega_b^b + m \mathbf{r}_g^b \times (\mathbf{v}_o^b - \mathbf{v}_c^b))] \quad (3.32)$$

Por otro lado, el momento \mathbf{n}_c^n es igual a $\mathbf{n}_c^n = \dot{\mathbf{h}}_c^n$ y $\mathbf{n}_c^n = \mathbf{R}_b^n (\mathbf{m}_o^b - \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{f}_c^b)$ siendo en este caso $\mathbf{f}_c^b = m(\dot{\mathbf{v}}_c^b + \omega_b^b \times \mathbf{v}_c^b)$. Igualando las expresiones de \mathbf{n}_c^n y realizando operaciones algebraicas se obtiene finalmente la ecuación del momento en el origen del marco B :

$$\mathbf{n}_o^b = \mathbf{I}_o \dot{\omega}_b^b + \omega_b^b \times (\mathbf{I}_o \omega_b^b) + m \mathbf{r}_g^b \times \dot{\mathbf{v}}_o^b + m \mathbf{r}_g^b \times (\omega_b^b \times \mathbf{v}_o^b) \quad (3.33)$$

Las ecuaciones 3.31 y 3.33 se pueden escribir en forma matricial, como se presenta a continuación:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_o^b \\ \mathbf{n}_o^b \end{bmatrix} = \mathbf{M}_R \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_o^b \\ \dot{\omega}_b^b \end{bmatrix} + \mathbf{C}_R(\mathbf{v}_o^b, \omega_b^b) \begin{bmatrix} \mathbf{v}_o^b \\ \omega_b^b \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

donde \mathbf{M}_R es la matriz de masas del cuerpo rígido, y $\mathbf{C}_R(\nu)$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis. La matriz de masas está dada de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} m \mathbf{I}_{3 \times 3} & -m \mathbf{S}(\mathbf{r}_g^b) \\ m \mathbf{S}(\mathbf{r}_g^b) & I_O \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

La matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis puede adoptar diferentes formas. En este caso adoptamos una que hace que esta matriz sea antisimétrica, es decir $\mathbf{C}_R(\nu) = -\mathbf{C}_R(\nu)^T$. Por lo tanto, esta matriz está dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{C}_R(\nu) = \begin{bmatrix} 0_3 & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{R11}\nu_1 + \mathbf{M}_{R12}\nu_2) \\ -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{R11}\nu_1 + \mathbf{M}_{R12}\nu_2) & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{R21}\nu_1 + \mathbf{M}_{R22}\nu_2) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

3.2.2 Fuerzas Hidrodinámicas

Las fuerzas hidrodinámicas que afectan un cuerpo sumergido son bastantes complejas ya que dependen de muchas variables como son las características del fluido, la temperatura, la presión y la forma geométrica del cuerpo, entre otras. Las fuerzas hidrodinámicas son la fuerzas de masa agregada y las fuerzas viscosas.

3.2.3 Masa Agregada

La masa agregada es una fuerza que se opone al movimiento del cuerpo en el fluido y depende de la aceleración del cuerpo, como también puede serlo de la velocidad. La masa agregada se suele asociar con la cantidad de fluido que se encuentra alrededor del cuerpo, y que debe acelerarse cuando el cuerpo también lo hace. Muchas veces se malinterpreta la masa añadida como una cantidad de fluido a agregar a la masa del cuerpo, sin embargo, la masa añadida es algo más complejo. A diferencia de la masa de cuerpo rígido, la masa agregada no siempre cumple con la propiedad de ser constante y simétrica, como tampoco es siempre diagonal, incluso se han reportado casos en donde posee elementos negativos. La manera más fiable de medir la masa agregada es a través de la experimentación. La forma como se hace es acelerar el cuerpo en dirección de los ejes y medir la variación en la fuerza requerida.

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Por otro lado a la matriz de masa agregada la podemos expresar en términos de cuatro submatrices:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{A11} & \mathbf{M}_{A12} \\ \mathbf{M}_{A21} & \mathbf{M}_{A22} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

La matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis de la masa agregada puede adoptar diferentes formas. Al igual que en el caso de $\mathbf{C}_R(\nu)$, adoptamos una que hace que esta matriz sea antisimétrica, es decir, $\mathbf{C}_A(\nu) = -\mathbf{C}_A(\nu)^T$. Por lo tanto, esta matriz está dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{C}_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{A11}\nu_1 + \mathbf{M}_{A12}\nu_2) \\ -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{A11}\nu_1 + \mathbf{M}_{A12}\nu_2) & -\mathbf{S}(\mathbf{M}_{A21}\nu_1 + \mathbf{M}_{A22}\nu_2) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Fuerzas Viscosas

Estas fuerzas son el resultado de la fricción que ejerce la viscosidad del fluido sobre el cuerpo. Se suelen clasificar según el efecto sobre el cuerpo en: fuerza de arrastre y fuerza de sustentación. Las fuerzas de arrastre se oponen al movimiento y actúan en dirección opuesta, mientras que las fuerzas de sustentación son perpendiculares al movimiento relativo del cuerpo sobre el fluido. Al igual que la masa agregada, la única forma de tener un conocimiento fiable de las magnitudes de dichas fuerzas es a través de la experimentación, con lo cual se obtendrá una matriz no lineal y compleja que varía en función de la velocidad del cuerpo.

Las fuerzas de amortiguación viscosa se pueden modelar de la siguiente manera:

$$f(u) = -\frac{1}{2}\rho_a C_D A_t |\mu| \mu \quad (3.40)$$

Donde u es la velocidad del vehículo, A es el área que se proyecta en un plano ortogonal a la dirección de la velocidad, C_D es el coeficiente de arrastre basado en una área representativa, y ρ_a es la densidad del agua. El coeficiente de arrastre $C_D(Rn)$ es una función del número de Reynolds: $Rn = \frac{UD}{\nu}$. Donde D es la longitud característica del

cuerpo y μ es el coeficiente de viscosidad cinemática ($\nu = 1.56 \times 10^{-6}$ para agua salada a 5 grados C con salinidad de 3.5).

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} |\nu| \mathbf{D}_{n1} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n2} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n3} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n4} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n5} \nu \\ |\nu| \mathbf{D}_{n6} \nu \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Donde $|\nu| = [|u|, |v|, |w|, |p|, |q|, |r|]^T$ y D_{ni} son matrices cuadradas de dimensión 6 que dependen de ρ_a , C_D y A_t . Los diferentes términos de amortiguamiento contribuyen a las amortiguaciones lineales y cuadráticas. Sin embargo, es generalmente difícil de separar esos efectos. En muchos casos es conveniente escribir el amortiguamiento hidrodinámico total como:

$$\mathbf{D}(\nu) = \mathbf{D}_l + \mathbf{D}_n \quad (3.42)$$

Donde D_l es la matriz de amortiguamiento lineal y D_n es la matriz de amortiguamiento no lineal. La matriz D tiene las siguientes propiedades: es real, no simétrica y es estrictamente positiva.

En general, el amortiguamiento de un vehículo submarino moviéndose en el espacio tridimensional a altas velocidades es altamente no lineal y acoplado. Sin embargo, una aproximación a groso modo es asumir que el robot realiza un movimiento desacoplado. Esto sugiere que la estructura de la matriz D con sólo términos lineales o cuadráticos en la diagonal:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} = & \text{diag} \{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ & - \text{diag} \{X_{|u|u} |u|, Y_{|v|v} |v|, Z_{|w|w} |w|, K_{|p|p} |p|, M_{|q|q} |q|, N_{|r|r} |r|\} \end{aligned}$$

3.2.4 Fuerzas de restitución

Además de las fuerzas hidrodinámicas, los vehículos submarinos son afectados por la gravedad y las fuerzas de flotabilidad. Estas fuerzas son llamadas fuerzas de restitución. La fuerza gravitacional \mathbf{f}_g^b actúa sobre el centro de gravedad, el cual está definido por el vector $\mathbf{r}_g^b = [x_g \ y_g \ z_g]^T$. De manera similar, la fuerza de flotabilidad \mathbf{f}_{by}^b actúa sobre el centro de flotabilidad definido por el vector $\mathbf{r}_{by}^b = [x_{by} \ y_{by} \ z_{by}]^T$. El peso de un cuerpo sumergido en el agua y la fuerza de flotabilidad están definidos de la siguiente manera:

$$W = mg \quad (3.43)$$

$$B = \rho_a g V \quad (3.44)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y V es el volumen desplazado por el robot.

Por lo tanto:

$$\mathbf{f}_g^n = [0 \ 0 \ W]^T \quad (3.45)$$

y

$$\mathbf{f}_{by}^n = -[0 \ 0 \ B]^T \quad (3.46)$$

Las fuerzas de gravedad y flotabilidad se pueden transformar al marco de referencia del cuerpo simplemente multiplicando por la inversa de la matriz de rotación \mathbf{R}_b^n , es decir, $\mathbf{f}_g^b = \mathbf{R}_b^{n-1} \mathbf{f}_g^n$ y $\mathbf{f}_{by}^b = \mathbf{R}_b^{n-1} \mathbf{f}_{by}^n$.

Por lo tanto, la fuerza y el momento de restitución en el marco de referencia del cuerpo está dado por la siguiente expresión:

$$\mathbf{g}(\nu) = - \begin{bmatrix} \mathbf{f}_g^b + \mathbf{f}_{by}^b \\ \mathbf{r}_g^b \times \mathbf{f}_g^b + \mathbf{r}_{by}^b \times \mathbf{f}_{by}^b \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

sustituyendo los elementos de cada vector, se tienen los siguientes valores para el vector de fuerzas de restitución:

$$g(\nu) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin \theta \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_g W - y_{by} B) \cos \theta \cos \phi + (z_g W - z_{by} B) \cos \theta \sin \phi \\ (z_g W - z_{by} B) \sin \theta + (x_g W - x_{by} B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x_g W - x_{by} B) \cos \theta \sin \phi - (y_g W - y_{by} B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Capítulo 4

Diseño y Modelado de Micro AUVs

4.1 Tritón

4.1.1 Descripción del Prototipo

El submarino *Tritón* es un vehículo sumergible de pequeña escala, cuyo sistema de propulsión consta de tres propulsores (motores DC) que impulsan las hélices marinas. El tamaño de este vehículo marino es de unos 35 cm de largo y 20 cm de diámetro, su estructura está construída de Nylamid. Debido a su estructura cilíndrica, el submarino *Triton* es capaz de operar en modo navegación estacionaria ó hover. En cuanto al movimiento de rotación de este vehículo, el control de guiñada (yaw) se realiza a través del control de velocidad diferencial de los propulsores 2 y 3. Por otro lado, el movimiento de traslación en el eje z es regulado por el incremento o decremento de la velocidad del propulsor 1. Similarmente, el movimiento de traslación del eje x se obtiene utilizando los propulsores 2 y 3. De manera que el desplazamiento de traslación en el eje y no está actuado (ver figuras [4.1](#) y [4.2](#)).

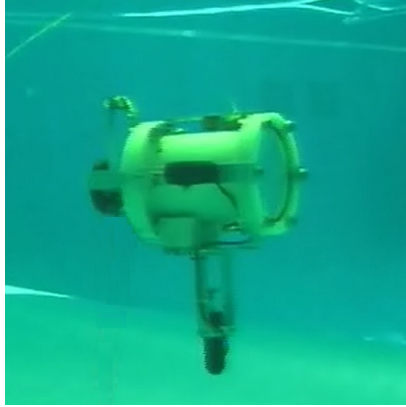


Figura 4.1: Prototipo Tritón.

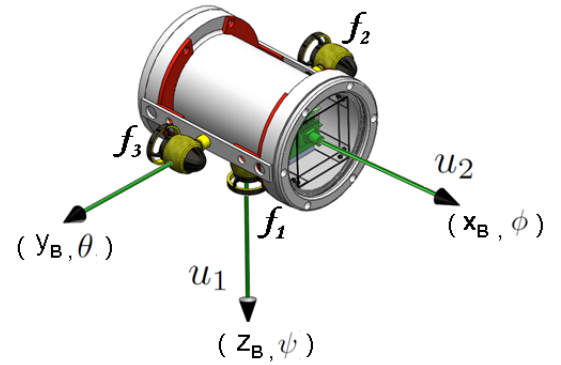


Figura 4.2: Diseño CAD del Tritón.

Sistema Embebido

El sistema embebido consta de una computadora embebida fit-PC2 con un microprocesador Intel Atom Z550 de 2GHz, 1GB DDR2-533 de memoria RAM; 160 GB de disco duro, 802.11n WLAN, Ethernet BaseT 1000, 6 puertos USB, 12V DC de alimentación. Este sistema embebido también incluye una unidad de medición inercial (UM6 sensor de orientación CH-Robotics), una cámara web Logitech Pro 9000, un sensor de presión, y un microcontrolador arduino uno. Por otro lado, la computadora embebida ejecuta el sistema operativo embebido Windows XP para proporcionar a los usuarios un ambiente amigable para el desarrollo de aplicaciones. Usando Visual C++ 2008, la computadora procesa la información de los sensores, calcula las leyes de control y envía las señales a los actuadores. La IMU proporciona los ángulos (roll, pitch y yaw) y velocidades angulares. Para comunicar la computadora embebida con los sensores analógicos y un microcontrolador arduino uno. También se utiliza un convertidor USB- I^2C como una interface entre la computadora embebida y los dispositivos I^2C .

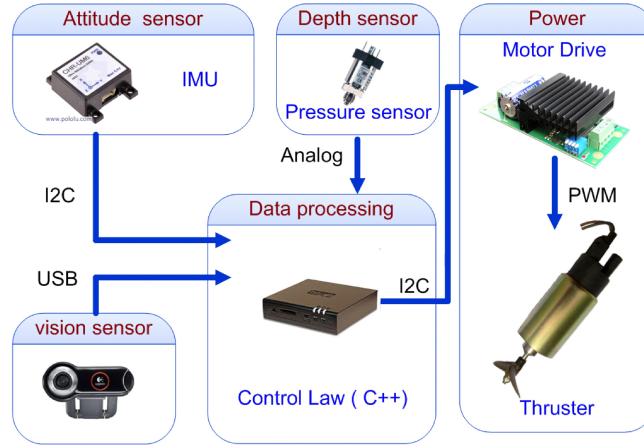


Figura 4.3: Sistema embebido del robot submarino.

4.1.2 Modelado Dinámico

El modelo dinámico del vehículo se describe utilizando las ecuaciones clásicas de Newton-Euler, y de acuerdo a las consideraciones propuestas en [17]:

$$M\dot{\boldsymbol{\nu}} + C(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + D(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} + g(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{w}_e \quad (4.1)$$

donde $M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ es la matriz de inercia, $C(\boldsymbol{\nu}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ es la matriz de coriolis y fuerzas centrífugas, $D(\boldsymbol{\nu}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ representa la matriz de amortiguamiento hidrodinámico, $g(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ describe el vector de fuerzas gravitacional y flotabilidad, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ es el vector de entradas de control; $\boldsymbol{w}_e \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ es el vector de perturbaciones; $\boldsymbol{\nu} = (\boldsymbol{\nu}_1, \boldsymbol{\nu}_2)^T = ((u, v, w), (p, q, r))^T \in \mathbb{R}^6$ y $\boldsymbol{\eta} = (\boldsymbol{\eta}_1, \boldsymbol{\eta}_2)^T = ((x, y, z), (\phi, \theta, \psi))^T \in \mathbb{R}^6$ son los vectores de velocidad en el marco de referencia fijo al cuerpo y la posición relativa con respecto al marco de referencia fijado a la tierra, respectivamente.

La orientación de vehículos submarinos, relativa al sistema de coordenadas fijo a la tierra, está dado por una transformación de velocidad lineal

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = J_1(\phi, \theta, \psi)\boldsymbol{\nu}_1 \quad (4.2)$$

donde la secuencia de rotación se escribe como:

$$J_1(\phi, \theta, \psi) = \mathbf{R}_\psi \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\phi \quad (4.3)$$

Por otro lado, el vector de velocidad angular fijado al cuerpo $\boldsymbol{\nu}_2$ y el vector velocidad de Euler $\boldsymbol{\eta}_2$ están relacionadas a través de una matriz de transformación J_2 como sigue (ver [20])

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_2 = J_2(\phi, \theta, \psi) \boldsymbol{\nu}_2 \quad (4.4)$$

la anterior (4.3) y (4.4) puede escribirse, con relación a la notación descrita en sname, como sigue:

$$J(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} J_1(\boldsymbol{\eta}_2) & 0 \\ 0 & J_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

como consecuencia, esto resulta

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = J(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\nu}} + J(\dot{\boldsymbol{\eta}})\boldsymbol{\nu} \implies \dot{\boldsymbol{\nu}} = J^{-1}(\boldsymbol{\eta})[\ddot{\boldsymbol{\eta}} - J(\dot{\boldsymbol{\eta}})J^{-1}(\boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}}] \quad (4.6)$$

$$M_\eta(\boldsymbol{\eta}) = J^{-T}(\boldsymbol{\eta})MJ^{-1}(\boldsymbol{\eta})$$

$$C_\eta(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\eta}) = J^{-T}(\boldsymbol{\eta})[C(\boldsymbol{\nu}) - MJ^{-1}(\boldsymbol{\eta})J(\dot{\boldsymbol{\eta}})]J^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \quad (4.7)$$

$$D_\eta(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\eta}) = J^{-T}(\boldsymbol{\eta})D(\boldsymbol{\nu})J^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \quad (4.8)$$

$$g_\eta(\boldsymbol{\eta}) = J^{-T}(\boldsymbol{\eta})g(\boldsymbol{\eta}) \quad (4.9)$$

$$\tau_\eta(\boldsymbol{\eta}) = J^{-T}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\tau} \quad (4.10)$$

$$(4.11)$$

finalmente, la ecuación (4.1) puede escribirse como:

$$M_\eta(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} + C_\eta(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}} + D_\eta(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\eta})\dot{\boldsymbol{\eta}} + g_\eta(\boldsymbol{\eta}) = \tau_\eta(\boldsymbol{\eta}) \quad (4.12)$$

La posición y la orientación del vehículo serán denotados con las variables η_1 y η_2 respectivamente, entonces, se tiene:

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T \quad \eta_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \eta_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

De forma similar se utiliza ν_1 y ν_2 como los vectores de velocidad traslacional y rotacional, por lo cual se tiene:

$$\nu = [\nu_1^T, \nu_2^T]^T \quad \nu_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad \nu_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Definiendo τ_1 y τ_2 como los vectores de fuerzas y momentos externos actuando en el mini submarino, se tiene:

$$\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T \quad \tau_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Fuerzas y momentos

Las fuerzas generadas por los propulsores que actúan en el mini submarino τ_1 (ver Figura 4.2) son descritas como sigue:

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} u_2 \\ 0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{f}_2 + \hat{f}_3 \\ 0 \\ \hat{f}_1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

para representar las fuerzas que actúan sobre el mini-submarino con respecto al marco inercial es necesario obtener la matriz de rotación utilizando la secuencia de rotación $R_I^B = R_\psi R_\theta R_\phi$. Más precisamente

$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_\theta = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Por lo tanto

$$R_I^B = \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & C_\psi S_\theta S_\phi - C_\phi S_\psi & C_\phi C_\psi S_\theta + S_\phi S_\psi \\ C_\theta S_\psi & C_\phi C_\psi + S_\theta S_\phi S_\psi & C_\phi S_\theta S_\psi - C_\psi S_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Con la finalidad de simplificar la nomenclatura de la matriz de rotación, se introduce la notación:

$$C_\phi = \cos(\phi), C_\psi = \cos(\psi), C_\theta = \cos(\theta), S_\phi = \sin(\phi), S_\psi = \sin(\psi), S_\theta = \sin(\theta).$$

Multiplicando la matriz de rotación por el vector τ_1 se obtiene el vector de fuerzas que actúan en el mini-submarino con respecto al marco inercial $F_\xi := R_I^B \tau_1$:

$$F_\xi = \begin{pmatrix} U_2 C_\theta C_\psi + U_1 [C_\phi C_\psi S_\theta + S_\phi S_\psi] \\ U_2 C_\theta S_\psi + U_1 [C_\phi S_\theta S_\psi - C_\psi S_\phi] \\ -U_2 S_\theta + U_1 C_\theta C_\phi \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

y los momentos se definen como:

$$\tau_2 = \sum_{i=1}^3 l_i \times \hat{f}_i \quad (4.20)$$

donde l_i es el vector de posición de la fuerza \hat{f}_i con respecto al origen O_B , por lo tanto

$$\tau_2 = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{d}{2}(f_2 - f_3) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} f_2 + f_3 \\ 0 \\ f_1 \\ 0 \\ 0 \\ l_{2y}f_2 + l_{3y}f_3 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Sustituyendo las ecuaciones 4.16 y 4.21 dentro de la ecuación 4.12 y asumiendo que el vehículo se desplaza a baja velocidad, esto es $\mathbf{C}(\boldsymbol{\nu}) \approx 0$ y $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) \approx 0$, de aquí, la ecuación no lineal del movimiento relativo, se simplifica como:

$$M_\eta(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} + g_\eta(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}) \quad (4.23)$$

Por cuestiones prácticas y de simplicidad, se considera que $M_\eta(\boldsymbol{\eta})$ está normalizada y que la fuerza de flotabilidad es mayor que el peso del vehículo ($B - W = b_p$), esto debido a que se permite recuperar el vehículo en la superficie en caso de algún problema de energía, por lo cual, reescribiendo la ecuación 4.23, se tiene:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= u_2 C_\theta C_\psi + u_1 [C_\phi C_\psi S_\theta + S_\phi S_\psi] & \ddot{\phi} &= \tau_\phi \\ \ddot{y} &= u_2 C_\theta S_\psi + u_1 [C_\phi S_\theta S_\psi - C_\psi S_\phi] & \ddot{\theta} &= \tau_\theta C_\phi - \tau_\psi S_\phi \\ \ddot{z} &= -u_2 S_\theta + u_1 C_\theta C_\phi - b_p & \ddot{\psi} &= -\tau_\phi S_\theta + \tau_\theta C_\theta S_\phi + \tau_\psi C_\phi C_\theta \end{aligned} \quad (4.24)$$

4.2 Cookie ROV

A continuación se presenta el diseño del micro vehículo llamado Cookie ROV, el cual tiene la característica de ser muy compacto porque tiene la forma de un pequeño cilindro, cuyas dimensiones corresponden a 15 cm de diámetro x 12 cm de alto y no excede los 4 kg, éste es considerado dentro del grupo de los micro vehículos (ver [10]). Debido a su forma cilíndrica, es fácil de calibrar su peso con respecto a la fuerza de flotabilidad, lo que le permite tener una excelente estabilidad en alabeo y cabeceo (roll y pitch) en

lazo abierto. De manera que este prototipo es muy útil para aplicaciones en modo ROV (Vehículo Operado Remotamente), ya que se le puede agregar un sistema de cámaras para monitoreo. Este prototipo alcanza una profundidad de 10 m, con opción de tener más alcance, siempre y cuando los conectores sumergibles soporten la profundidad deseada.

4.2.1 Descripción del Prototipo

En las imágenes 4.4 y 4.5 se presenta el prototipo desarrollado físicamente y el diseño del micro vehículo con la ayuda del programa SolidsWorks. Su diseño tiene localizados dos motores para el movimiento el plano horizontal y dos motores para el movimiento en el plano vertical.

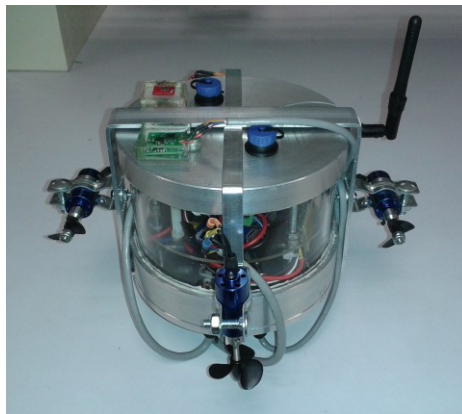


Figura 4.4: Cookie ROV.

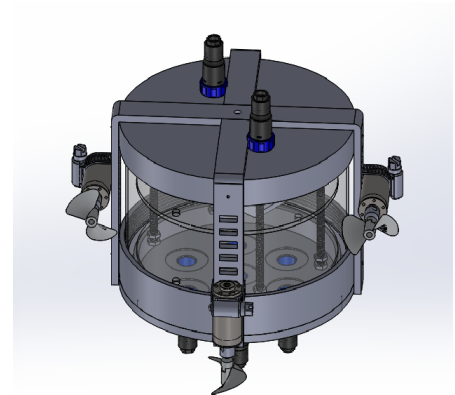


Figura 4.5: Diseño CAD
Cookie ROV.

Sistema Embebido

En la figura 4.6 se presenta la arquitectura interna del vehículo Cookie ROV con la integración de dispositivos electrónicos, como son: la IMU CMPS10, el sensor barométrico BMP085, un hidrófono BII-7011 para el sistema de sensado, mientras que para el procesamiento de los algoritmos se usa un Gumstix modelo overo fire y para la etapa

de potencia se utilizan drivers controladores de velocidad para ambas direcciones del motor trifásico sin escobillas.

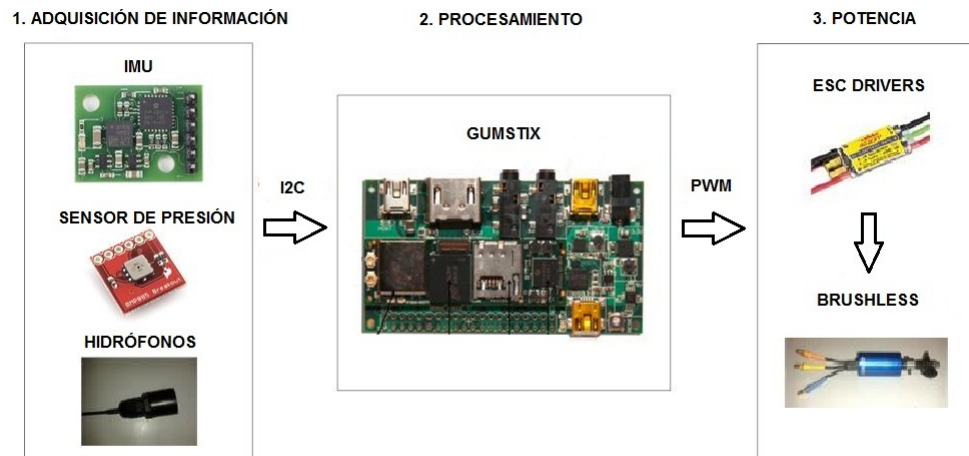


Figura 4.6: Arquitectura interna del Prototipo Cookie ROV

Descripción del Movimiento

Movimientos de Rotación

En la dinámica rotacional del prototipo, como se puede notar en la imagen 4.7, los motores que efectúan la fuerza f_1 y f_2 permiten rotar al vehículo en cabeceo (pitch) si hay una diferencia en las magnitudes de fuerza correspondientes. Mientras que para obtener la rotación en guiñada (yaw), se requiere de la diferencia de fuerzas f_3 y f_4 como se muestra en la imagen 4.8. Además en el diseño de este vehículo, la rotación en roll (alabeo), no está actuada, lo que indica una dinámica desacoplada para este caso, ya que con sólo rotar el vehículo 90 grados en ángulo yaw y activar los motores verticales, se logra obtener el movimiento deseado en el alabeo.

Movimientos de Traslación

Para la dinámica traslacional, el desplazamiento en dirección del eje x , se efectúa mediante la suma vectorial de las fuerzas f_3 y f_4 , éstas deben ser equivalentes, mientras que para lograr el desplazamiento sobre el eje z , se requiere de la suma vectorial de

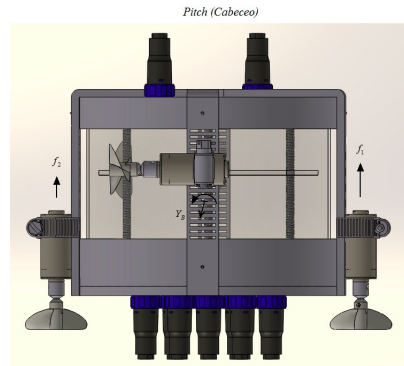


Figura 4.7: Movimiento de rotación en pitch.

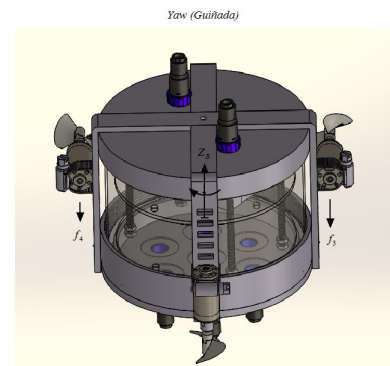


Figura 4.8: Movimiento de rotación en yaw.

las fuerzas f_1 y f_2 , siendo éstas equivalentes respectivamente. De igual manera que la dinámica en roll, si se requiere un movimiento sobre el eje y , basta con girar 90 grados el vehículo en ángulo yaw y ejercer la suma vectorial de fuerzas f_3 y f_4 , de igual manera, éstas deben ser equivalentes (ver figura 4.9).

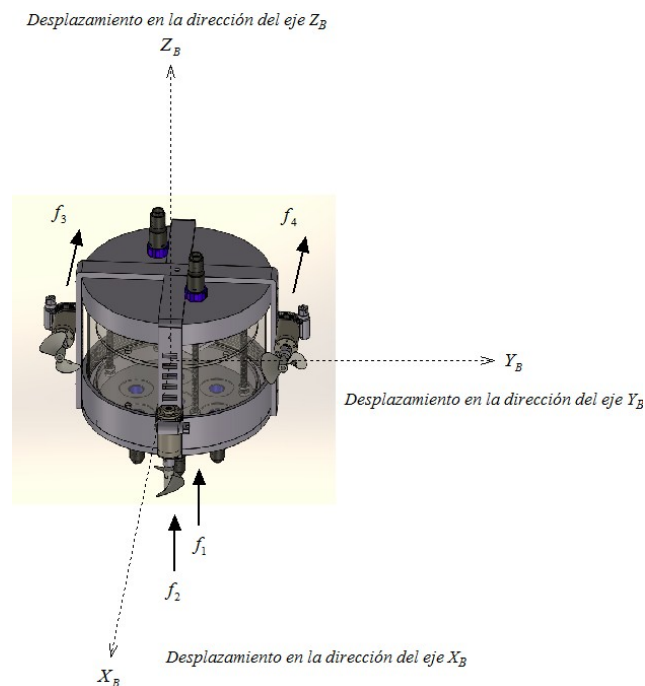


Figura 4.9: Movimientos de traslación.

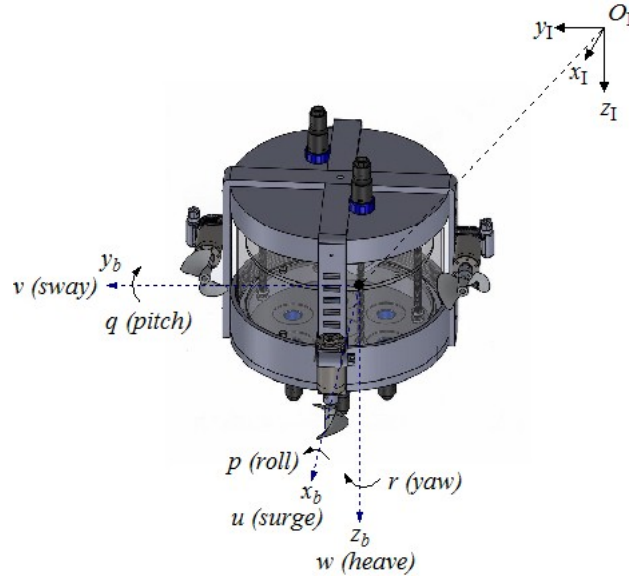


Figura 4.10: El prototipo μ AUV Cookie ROV, con su marco de referencia fijo al cuerpo (O_b, x_b, y_b, z_b), y el marco de referencia fijo a la tierra (O_I, x_I, y_I, z_I).

4.2.2 Modelado dinámico de Cookie ROV

Considerando la ecuación 4.1 que representa el modelo dinámico del vehículo Cookie ROV de acuerdo a Newton-Euler, se tiene:

Matriz de Inercia

$$M = M_{RB} + M_A \quad (4.25)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_{ine} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

donde:

$$I_x = \frac{1}{2}mr_c^2 \quad I_y = I_z = \frac{1}{12}m(3r_c^2 + L^2) \quad (4.28)$$

r_c : representa el radio del cilindro y L su longitud.

Debido a la simetría del vehículo y a las bajas velocidades de su desplazamiento, es posible despreciar los valores que se encuentran fuera de la diagonal principal de la matriz M_A , entonces:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Los elementos de la diagonal principal de la matriz (4.29) se estiman utilizando las siguientes ecuaciones.

$$X_{\dot{u}} = -0.1m \quad (4.30)$$

$$Y_{\dot{v}} = -\pi\rho r^2 L \quad (4.31)$$

$$Z_{\dot{w}} = -\pi\rho r^2 L \quad (4.32)$$

$$K_{\dot{p}} = 0 \quad (4.33)$$

$$M_{\dot{q}} = -\frac{1}{2}\pi\rho r^2 L^3 \quad (4.34)$$

$$N_{\dot{r}} = -\frac{1}{2}\pi\rho r^2 L^3 \quad (4.35)$$

Donde L representa la longitud del vehículo submarino, m la masa del vehículo, ρ la densidad del fluido y r el radio del vehículo.

Matriz de parámetros hidrodinámicos

El amortiguamiento se presenta cuando un objeto se encuentra en movimiento dentro de un fluido.

$$D = \begin{bmatrix} \tau D_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \tau D_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau D_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \tau D_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tau D_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau D_\psi \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\tau D_i = -12 \frac{A_i \mu u_i}{d_i} - \frac{1}{2} A_i \rho u_i |u_i| \quad (4.37)$$

donde u_i representa la velocidad en la dirección del eje $i = x, y, z, \phi, \theta, \psi$; A_i es el área de sección transversal, d_i la dimensión característica perpendicular a u_i , μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Momentos y fuerzas gravitacional/flotabilidad

Por el principio de Arquímedes se tiene que todo objeto que está sumergido en un fluido experimentará una fuerza de empuje en sentido opuesto al vector del peso, la cual depende del peso del volumen del líquido desplazado y de la densidad del agua. De acuerdo con la nomenclatura del SNAME se tiene:

$$W = mg, \quad \beta = \rho_f g V \quad (4.38)$$

donde:

W = peso del mini-submarino.

m = masa del vehículo.

g = la aceleración gravitacional.

β = flotabilidad.

ρ_f = densidad del agua.

V = volumen del fluido desplazado.

$$f_W = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -W \end{pmatrix} \quad f_\beta = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta \end{pmatrix} \quad (4.39)$$

$$f_{WB} = R_B^I f_W \quad (4.40)$$

$$f_{\beta B} = R_B^I f_\beta \quad (4.41)$$

Fuerzas y momentos generados por los propulsores

Para representar las fuerzas que actúan sobre el mini-submarino con respecto al marco inercial es necesario obtener la matriz de rotación utilizando la secuencia de rotación

$$R_I^B = R_\psi R_\theta R_\phi.$$

$$\tau_1 = \begin{bmatrix} U_2 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_3 + f_4 \\ 0 \\ f_1 + f_2 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Multiplicando la matriz de rotación por el vector τ_1 se obtiene el vector de fuerzas que actúan en el mini-submarino con respecto al marco inercial $F_\xi := R_I^B \tau_1$:

$$F_\xi = \begin{pmatrix} U_2 C_\theta C_\psi + U_1 [C_\phi C_\psi S_\theta + S_\phi S_\psi] \\ U_2 C_\theta S_\psi + U_1 [C_\phi S_\theta S_\psi - C_\psi S_\phi] \\ -U_2 S_\theta + U_1 C_\theta C_\phi \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

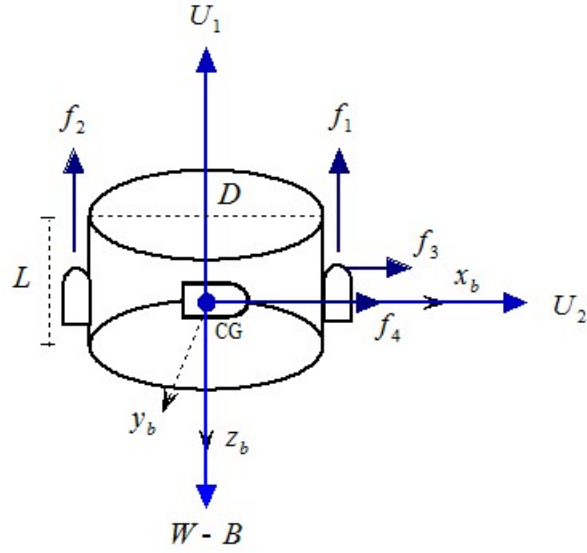


Figura 4.11: Fuerzas generadas por los cuatro propulsores del vehículo $f_i \forall i = [1...4]$. CG describe la posición del centro de gravedad.

El vector τ_2 se obtiene a partir del producto cruz de las fuerzas que actúan sobre el micro-submarino por sus respectivas distancias respecto del centro de masa.

$$\tau_2 = \sum_{i=1}^4 l_i \times \hat{f}_i \quad (4.44)$$

$$\tau_2 = \begin{bmatrix} K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_{1x}f_1 + l_{2x}f_2 \\ l_{3y}f_3 + l_{4y}f_4 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} f_3 + f_4 \\ 0 \\ f_1 + f_2 \\ 0 \\ l_{1x}f_1 + l_{2x}f_2 \\ l_{3y}f_3 + l_{4y}f_4 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

4.3 AR2D2

El prototipo micro AUV AR2D2, mostrado en la figura 4.12, tiene una longitud de 35 cm y un espacio vertical de 20 cm, con un peso aproximado de 4.5 kg. Los diferentes grados de libertad del μ AUV están actuados por cuatro propulsores de hélice. Es importante mencionar, que la forma geométrica del prototipo, es tal que los movimientos horizontales y verticales pueden ser considerados desacoplados.

4.3.1 Descripción del Prototipo

A continuación se muestran detalles del desarrollo del prototipo, así como como la descripción de su dinámica y su modelado correspondiente.

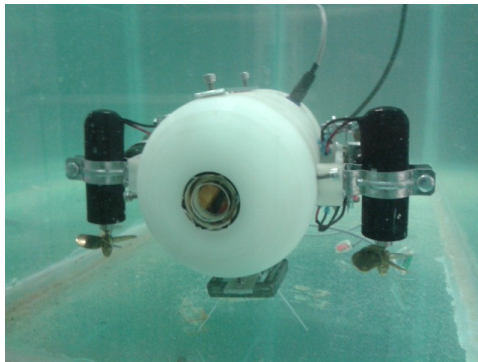


Figura 4.12: Prototipo AR2D2.

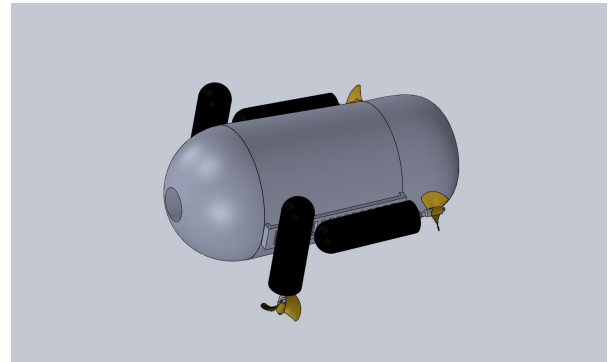


Figura 4.13: Diseño CAD AR2D2.

Sistema Embebido

La arquitectura de hardware del prototipo consiste de un sistema embebido, que contiene un Raspberry pi 2, con un procesador ARM cortex ARMv7 de 900 MHz, 1 GB de memoria RAM, Video Core IV GPU, 4 USB, Ethernet, HDMI y un slot para tarjeta SD que contiene el sistema operativo basado en plataforma Linux, cuya programación se realiza en C++. Este sistema embebido también incluye una unidad de medición inercial (UM6 Orientation Sensor CH-Robotics), esta provee los ángulos de euler (roll,

pitch, yaw) y velocidades angulares. La adquisición de información para medición de distancia se basa en un módulo de procesamiento de señal PW0268 que opera con un transductor ultrasónico 200LM450 de bajo costo (LOCUS). El dispositivo sensor LOCUS utiliza una longitud de onda corta como un método de detección de eco en un pulso clásico (similar a un sistema de ecosounder) para una medición de rango cerrado (máximo 2m) y evasión de obstáculos (máximo 5m) [16]. El sistema básico de ecosonido opera en un rango de frecuencia de 20 a 500 kHz. El transductor 200LM450 y el módulo de procesamiento de señal consiste de principales componentes, tales como un amplificador, un filtro pasabanda y un acoplador de impedancia. El raspberry procesa la información de los sensores, calcula las leyes de control y envía señal a los actuadores (motores de CD) controlados por modulación de ancho de pulso (PWM) mediante los drivers (Robbe Rookie 25A ESC). La comunicación en tiempo real se provee usando la interface ethernet LAN. En la figura (4.14) se muestra un esquema resumido de los diferentes componentes del hardware del vehículo e interfaces de comunicación.

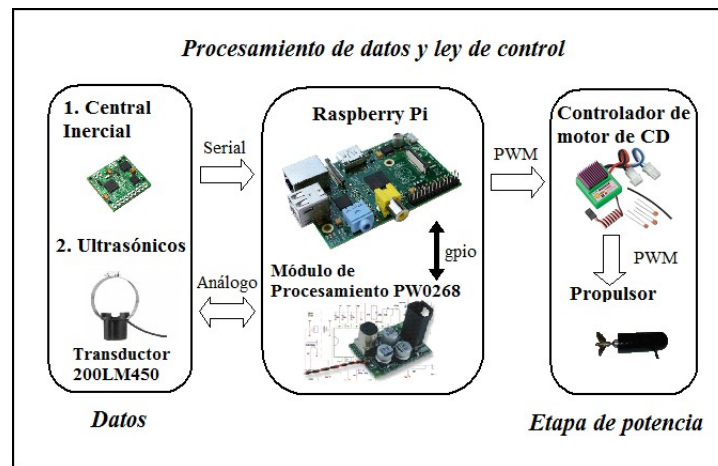


Figura 4.14: Sistema Embebido del AUV

Descripción del Movimiento

Se ha diseñado y construido el micro submarino AR2D2, el cual se muestra en la figura 4.15, con su marco de referencia fijo al cuerpo (O_b, x_b, y_b, z_b). El centro (O_b) de este marco corresponde al centro gravitatorio del vehículo, y sus ejes son alineados con los principales ejes de simetría del vehículo. El movimiento en el plano horizontal es referido como *surge* (a lo largo del eje x_b) y *sway* (a lo largo del eje y_b), mientras *heave* representa el movimiento vertical (a lo largo del eje z_b). Roll, pitch y yaw, denotados por (ϕ, θ, ψ) , cuyos ángulos de Euler describen la orientación del marco de referencia fijo al cuerpo con respecto al marco de referencia fijo a la tierra (O_I, x_I, y_I, z_I), mientras (x, y, z) representan las coordenadas en el centro del marco de referencia fijo al cuerpo dentro del marco de referencia fijo a la tierra. El sistema de propulsión consiste de cuatro propulsores, como se muestra en la figura 4.16, el cual genera el movimiento rotacional y traslacional. Con respecto al movimiento rotacional de este prototipo, la dinámica en roll es desempeñada mediante el control diferencial de velocidad de los propulsores 1 y 2. El movimiento en Yaw se obtiene similarmente utilizando los propulsores 3 y 4, finalmente el movimiento en Pitch no está actuado. Por otro lado, el movimiento traslacional del eje z_b es regulado por el incremento y decremento de la velocidad combinada por los propulsores 1 y 2. Similarmente, el movimiento traslacional a lo largo de los ejes x_b y y_b se obtiene a través de los propulsores 3, 4 y el control del ángulo yaw.

4.3.2 Modelado dinámico de AR2D2

La dinámica del vehículo se representa en el marco de referencia fijo al cuerpo, considerando la ecuación 4.1 de acuerdo a [17]:

Momentos y fuerzas gravitacional/flotabilidad

De acuerdo al principio de Arquímedes, la fuerza de flotabilidad \mathbf{f}_B se aplica sobre el centro de flotabilidad y actúa en dirección opuesta al peso del vehículo \mathbf{f}_W . Esto es:

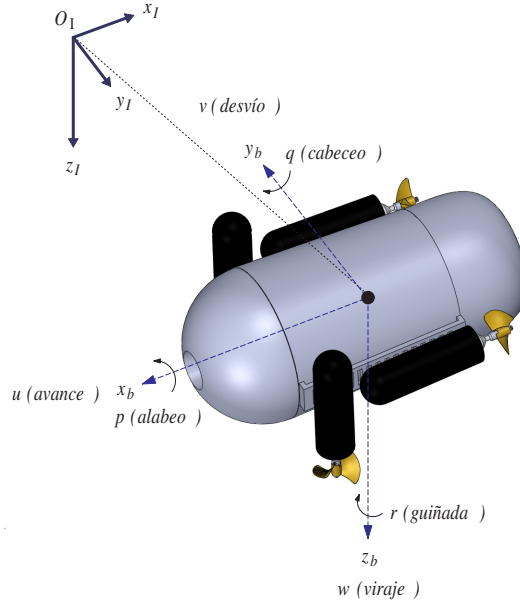


Figura 4.15: Vehículo AUV AR2D2, con marco de referencia fijo al cuerpo (O_b, x_b, y_b, z_b), y marco de referencia fijo a la tierra (O_I, x_I, y_I, z_I).

$$\mathbf{f}_B = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho g \nabla \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}_W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

donde:

ρ , representa la densidad del fluido.

g , la aceleración gravitacional.

∇ , el volumen del fluido desplazado.

m , la masa del vehículo.

Ahora, considerando que $W = mg$ y $B = \rho g \nabla$, utilizando la convención zyx para aplicaciones de navegación y control (ver [18]), entonces la matriz de transformación $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = R_{z,\psi} R_{y,\theta} R_{x,\phi}$ se aplica para obtener las fuerzas de flotabilidad y peso con respecto al sistema de coordenadas fijo al cuerpo, esto es:

$$\mathbf{F}_B = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^{-1} \mathbf{f}_B \quad \mathbf{F}_W = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^{-1} \mathbf{f}_W \quad (4.48)$$

consecuentemente

$$\mathbf{F}_B = \begin{bmatrix} B \sin(\theta) \\ -B \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -B \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_W = \begin{bmatrix} -W \sin(\theta) \\ W \cos(\theta) \sin(\phi) \\ W \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Tal que, las fuerzas de restitución sobre el vehículo son $\mathbf{f}_g = \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_W$, esto es:

$$\mathbf{f}_g = \begin{bmatrix} (B - W) \sin(\theta) \\ (W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (W - B) \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

De otro modo, los momentos de restauración se describen mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{m}_g = \mathbf{r}_w \times \mathbf{F}_W + \mathbf{r}_b \times \mathbf{F}_B \quad (4.51)$$

donde:

$\mathbf{r}_w = [x_w, y_w, z_w]^T$ y $\mathbf{r}_b = [x_b, y_b, z_b]^T$ representan las posiciones del centro de gravedad (CG) y el centro de flotabilidad (CB) respectivamente. Basado en el diseño del vehículo y con el objetivo de reducir más aún el análisis, el origen del marco de referencia fijo al cuerpo se selecciona en el centro gravitatorio, esto implica que: $\mathbf{r}_w = [0, 0, 0]^T$; mientras el centro de flotabilidad es $\mathbf{r}_b = [0, 0, -z_b]^T$. Para propósitos prácticos, la fuerza de flotabilidad es mayor que el peso, es decir, $W - B = -f_b$.

Observe que f_b debe ser menor que la fuerza producida por los propulsores. Por lo tanto, de las ecuaciones (4.50) y (4.51), tenemos:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_g \\ \mathbf{m}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_b \sin(\theta) \\ -f_b \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -f_b \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -z_b B \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -z_b B \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Fuerzas y torques generados por los propulsores

La figura 4.16 muestra las fuerzas generadas por los propulsores actuando sobre el vehículo, éstas son descritas en relación al sistema coordenado fijo al cuerpo, como

$$\hat{\mathbf{f}}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_1 \end{bmatrix}; \hat{\mathbf{f}}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_2 \end{bmatrix}; \hat{\mathbf{f}}_3 = \begin{bmatrix} f_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \hat{\mathbf{f}}_4 = \begin{bmatrix} f_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

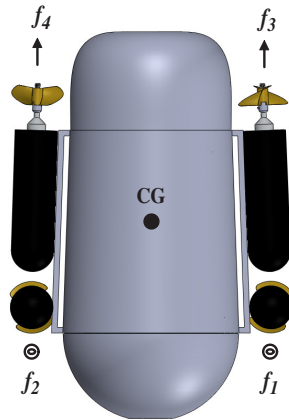


Figura 4.16: Fuerzas $f_i \forall i = [1...4]$ generados por los cuatro propulsores del vehículo. CG denota la posición del centro de gravedad.

reduciendo y usando la notación de [22], se sigue que:

$$\boldsymbol{\tau}_1 = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_3 + f_4 \\ 0 \\ f_1 + f_2 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

y los torques fijos al cuerpo generados por encima de las fuerzas, se definen como:

$$\boldsymbol{\tau}_2 = \sum_{i=1}^4 \mathbf{l}_i \times \hat{\mathbf{f}}_i \quad (4.55)$$

donde $\mathbf{l}_i = (l_{ix}, l_{iy}, l_{iz})$ es la posición del vector fuerza $\hat{\mathbf{f}}_i \forall i = 1, \dots, 4$, con respecto al marco de referencia fijo al cuerpo. Entonces, los torques generados por los propulsores se describen como:

$$\boldsymbol{\tau}_2 = \begin{bmatrix} \tau_K \\ \tau_M \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{1x}(f_1 + f_2) \\ 0 \\ l_{3y}(f_3) + l_{4y}(f_4) \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

entonces

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} f_3 + f_4 \\ 0 \\ f_1 + f_2 \\ 2l_{1x}f_1 \\ 0 \\ (f_3 - f_4)(l_{3y} + l_{4y}) \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Capítulo 5

Control de Micro AUVs

El control de un vehículo submarino es en general un problema complicado, esto debido a que es un sistema no lineal y variante en el tiempo. En ocasiones existen incertidumbres en los parámetros del robot, además de las perturbaciones ocasionadas por las corrientes marinas.

Sistema de Control

El sistema de control es el encargado de calcular las fuerzas necesarias que debe generar el sistema de propulsión para que el vehículo alcance las referencias deseadas. La construcción del sistema de control involucra el diseño y la sintonización de las Leyes de Control que regularán los movimientos del vehículo. El sistema de control recibe información de la posición, velocidad y aceleración deseada, además del estado actual de estas variables mediante los sensores del vehículo. Este sistema puede consistir en leyes de control clásico, control no lineal, control inteligente, sistemas basados en comportamiento, etc.

Control Clásico

Para controlar vehículos submarinos, se pueden emplear las distintas técnicas de control que se han utilizado en otros sistemas. Este es el caso de los controladores en lazo cerrado que realimentan las señales medidas por los sensores del vehículo, como lo son los controladores PI, PD y PID. Dada la estructura del modelo dinámico presentado en

forma matricial se podrían extrapolar las distintas leyes de control que se han propuesto para robots manipuladores.

Estabilidad de vehículos submarinos

La estabilidad de un vehículo submarino puede ser definida como su habilidad para retornar al estado de equilibrio después de una perturbación que dé origen a un movimiento a partir de dicho estado de equilibrio. Un punto importante es la maniobrabilidad, la cual se define como la capacidad del vehículo para llevar a cabo un movimiento específico, es así como se definen 2 tipos de estabilidad.

Estabilidad en lazo abierto: es debida al equilibrio de fuerzas naturales en el vehículo, es decir, la fuerza de flotabilidad en equilibrio con el peso del objeto.

Estabilidad en lazo cerrado: se habla de estabilidad en lazo cerrado, cuando se hace uso de las señales provenientes de los sensores para su retroalimentación, en base a un algoritmo de control que mande consignas a los propulsores para mantener al vehículo en un punto de equilibrio aún en presencia de perturbaciones.

5.1 Control PID implementado en Micro AUVs

La ecuación que describe la dinámica del vehículo se escribe de la siguiente forma:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + \omega \quad (5.1)$$

Para llevar el sistema de la ecuación 5.1 al marco de referencia inercial, considerando las transformaciones correspondientes y trabajar con las variables de estado η y ν , sin tomar en cuenta el vector de perturbaciones ω por simplicidad. Se tiene:

$$M_{\eta}(\eta)\ddot{\eta} + C_{\eta}(\nu, \eta)\dot{\eta} + D_{\eta}(\nu, \eta)\dot{\eta} + g_{\eta}(\eta) = \tau_{\eta} \quad (5.2)$$

De tal manera que se propone linealizar el sistema (5.2) por retroalimentación, mediante la siguiente entrada de control:

$$\tau_\eta = C_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) + M_\eta(\eta)\tau_u \quad (5.3)$$

se obtiene que:

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} = M_\eta(\eta)\tau_u \quad (5.4)$$

lo cual resulta:

$$\ddot{\eta} = \tau_u \quad (5.5)$$

donde:

$$\tau_u = \begin{pmatrix} F_\xi \\ \tau_m \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Ahora, considerando la fuerza de flotabilidad ligeramente mayor que el peso, esto con la finalidad de que el vehículo emerja naturalmente por seguridad de recuperarlo fácilmente en caso de algún problema de energía. De tal forma, que dicha fuerza debe incorporarse en el modelo para ser contemplada en la ley de control. Así en la ecuación (5.7), se aprecia que la fuerza b_p actúa directamente sobre el eje vertical del marco inercial. De este modo, el modelo matemático aproximado que describe la dinámica del vehículo, asumiendo ángulos pequeños, deducida de la ecuación 4.19, se obtiene:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= u_2 C_\theta C_\psi + u_1 [C_\phi C_\psi S_\theta + S_\phi S_\psi] & \ddot{\phi} &= \tau_\phi \\ \ddot{y} &= u_2 C_\theta S_\psi + u_1 [C_\phi S_\theta S_\psi - C_\psi S_\phi] & \ddot{\theta} &= \tau_\theta C_\phi - \tau_\psi S_\phi \\ \ddot{z} &= -u_2 S_\theta + u_1 C_\theta C_\phi - b_p & \ddot{\psi} &= -\tau_\phi S_\theta + \tau_\theta C_\theta S_\phi + \tau_\psi C_\phi C_\theta \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.1.1 Estrategia de Control

Los controladores PID se utilizan principalmente en sistemas SISO invariantes en el tiempo (LTI).

Estos controladores en lazo cerrado que realimentan las señales medidas por los sensores del vehículo, en este caso para un controlador PID, la ley de control se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_{PID} = \mathbf{J}(\nu)^T \left[\mathbf{K}_p \tilde{\eta} + \mathbf{K}_d \dot{\tilde{\eta}} + \mathbf{K}_i \int \tilde{\eta}(\sigma) d\sigma \right] \quad (5.8)$$

donde $\tilde{\eta} = \eta_d - \eta$ es el error entre la posición real y la deseada, \mathbf{K}_p es la matriz de ganancias proporcionales, \mathbf{K}_d corresponde a la matriz de ganancias derivativas, y \mathbf{K}_i es la matriz de ganancias integrales.

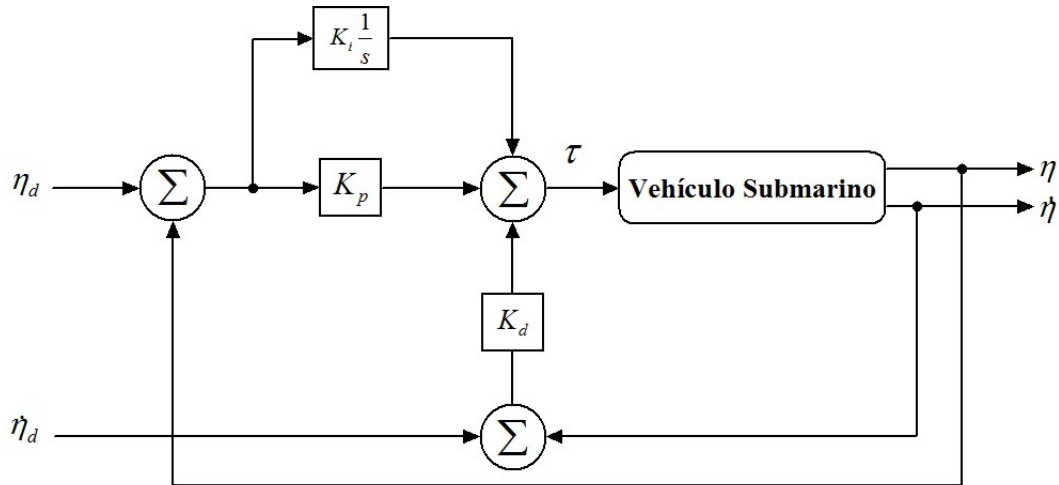


Figura 5.1: Controlador PID.

Al aplicar un controlador PID clásico para el control en yaw. La entrada de control, se representa como:

$$\tau_\psi = -K_p(\psi - \psi_d) - K_i \int_0^t (\psi - \psi_d) dt - K_d(\dot{\psi} - \dot{\psi}_d) \quad (5.9)$$

donde τ_ψ es la entrada en Newtons para aplicarse alrededor de la rotación del eje z , K_p , K_d y K_i son las ganancias constantes positivas, correspondientes a la ganancia proporcional, derivativa e integral. ψ es el ángulo yaw medido, mientras que ψ_d es el ángulo yaw deseado, $\dot{\psi}$ y $\dot{\psi}_d$ son sus respectivas derivadas.

La entrada de control de la ecuación 5.9 se basa en la descripción matemática del controlador PID, dado por:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5.10)$$

donde $e(t)$ es la señal de error, K_p la ganancia proporcional, T_i el tiempo integral y T_d el tiempo derivativo.

Para sintonizar los parámetros del controlador, existen varios métodos en la literatura. La sintonización se puede llevar a cabo incluyendo la respuesta al escalón, respuesta en frecuencia y minimización. El método mejor conocido de estos es Ziegler-Nichols. El tipo de sintonización depende de los requerimientos de diseño del sistema, así como el criterio de desempeño o robustez.

Cuando un controlador PID es utilizado en un sistema no lineal, la sintonización por métodos tradicionales puede ser complicada. En este caso, la sintonización manual puede llevarse a cabo con un enfoque empírico.

5.2 Control PD Saturado

5.2.1 Estrategia de Control

A continuación se presenta el algoritmo de control PD saturado para estabilizar la orientación del vehículo. Para la aplicación de algoritmos de control en sistemas, se deben considerar las restricciones de los actuadores, ya que éstos no proveen una respuesta infinita. Por esta razón el algoritmo de control mostrado en esta sección está basado en entradas acotadas.

$$\begin{aligned} \tau_\phi &= f(\phi, \dot{\phi}) = -\sigma_{b\phi_2}(k_{\phi_2}\dot{\phi}) - \sigma_{b\phi_1}(k_{\phi_1}\phi) \\ \tau_\theta &= f(\theta, \dot{\theta}) = -\sigma_{b\theta_2}(k_{\theta_2}\dot{\theta}) - \sigma_{b\theta_1}(k_{\theta_1}\theta) \\ \tau_\psi &= f(\psi, \dot{\psi}) = -\sigma_{b\psi_2}(k_{\psi_2}\dot{\psi}) - \sigma_{b\psi_1}(k_{\psi_1}\psi) \end{aligned} \quad (5.11)$$

esto implica que existe un tiempo tal que $\phi \rightarrow 0$, $\theta \rightarrow 0$ y $\psi \rightarrow 0$ con lo cual se tiene:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= U_2 & \ddot{\phi} &= f(\phi, \dot{\phi}) \\ \ddot{y} &= 0 & \ddot{\theta} &= f(\theta, \dot{\theta}) \\ \ddot{z} &= U_1 C_\phi - W_p & \ddot{\psi} &= f(\psi, \dot{\psi}) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Se puede notar que el movimiento de traslación sobre el eje x ahora depende únicamente de la entrada de control U_2 y el movimiento sobre el eje z depende de U_1 por lo cual se proponen las siguientes leyes de control:

$$U_1 = \frac{f(z, \dot{z}) + W_p}{C_\phi} \quad U_2 = f(x, \dot{x}) \quad (5.13)$$

donde

$$\begin{aligned} f(z, \dot{z}) &= -\sigma_{bz_2}(k_{z_2} \dot{z}) - \sigma_{bz_1}(k_{z_1}(z - z_d)) \\ f(x, \dot{x}) &= -\sigma_{bx_2}(k_{x_2} \dot{x}) - \sigma_{bx_1}(k_{x_1} x) \end{aligned} \quad (5.14)$$

donde las k_{ij} son constantes positivas tal que los polinomios $s^2 + k_{ij}s + k_{ij-1}$ sean estables (donde $i = \theta, \psi, x, z, j = 2$ y σ_b es una función saturación de la forma:

$$\sigma_b(s) = \begin{cases} b & \text{si } s > b \\ s & \text{si } -b \leq s \leq b \\ -b & \text{si } s < -b \end{cases} \quad (5.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones(5.13) en el sistema(5.12) se asume que existe un tiempo tal que:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= f(x, \dot{x}) & \ddot{\phi} &= f(\phi, \dot{\phi}) \\ \ddot{y} &= 0 & \ddot{\theta} &= f(\theta, \dot{\theta}) \\ \ddot{z} &= f(z, \dot{z}) & \ddot{\psi} &= f(\psi, \dot{\psi}) \end{aligned} \quad (5.16)$$

5.2.2 Análisis de estabilidad

Los sistemas en lazo cerrado para x, z, ϕ, θ, ψ tienen la forma de un doble integrador, como sigue:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= u \end{aligned} \quad (5.17)$$

De acuerdo a [28], a continuación se presenta el análisis de estabilidad para el control por medio de funciones de saturación.

Definición 1. (*Función de saturación lineal*)

Dadas dos constantes positivas L, M con $L \leq M$, una función $\sigma : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, se denomina una función de saturación lineal para (L, M) si es una función continua, no decreciente y satisface:

1. $s\sigma(s) > 0 \quad \forall s \neq 0$
2. $\sigma(s) = 0 \quad \text{cuando } |s| \leq L$
3. $|\sigma(s)| \leq M \quad \forall s \in \mathbb{R}$

Se considera un sistema lineal constituido por multiples integradores de la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= u \end{aligned} \tag{5.18}$$

Con esta técnica se desea encontrar una ley de control que estabilice de forma asintótica y globalmente el sistema 5.17, por lo cual se define el siguiente teorema:

Teorema 1. *Existe una función lineal $h_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ tal que para cualquier conjunto de constantes $\{(L, M)\}$ donde $L_i \leq M_i$ para $i = 1, \dots, n$ y $M_i < \frac{L_{i+1}}{2}$ para $i = 1, \dots, n-1$, y para cualquier conjunto de funciones $\{\sigma_i\}$ que son saturaciones lineales para $\{(L_i, M_i)\}$, el control acotado:*

$$u = -\sigma_n(h_n(x) + \sigma_{n-1}(h_{n-1}(x) + \dots + \sigma_1(h_1(x)))) \dots$$

da como resultado una estabilización asintótica global del sistema 5.18.

Demostración. Se considera la siguiente transformación de coordenadas $y = Tx$, la cual transforma el sistema (5.17) en $\dot{y} = Ay + Bu$ donde A y B son definidas como:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

en donde la transformación tiene las siguientes características:

$$y_{n-i} = \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} x_{n-i} \quad (5.20)$$

donde

$$\binom{i}{j} = \frac{i!}{j!(i-j)!} \quad (5.21)$$

y la transformación inversa se caracteriza por la siguiente expresión:

$$x_{n-i} = \sum_{j=0}^i (-1)^{i+j} \binom{i}{j} y_{n-i} \quad (5.22)$$

donde la ley de control u , se expresa como:

$$u = -\sigma_n(y_n + \sigma_{n-1}(y_{n-1} + \cdots + \sigma_1(y_1))) \cdots \quad (5.23)$$

al obtener el sistema en lazo cerrado, se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2 + \cdots + y_n + u \\ \dot{y}_2 &= y_3 + \cdots + y_n + u \\ &\vdots \\ \dot{y}_{n-1} &= y_n + u \\ \dot{y}_n &= u \end{aligned} \quad (5.24)$$

Se propone la función candidata de Lyapunov

$$V_n = y_n^2 \quad (5.25)$$

en donde su derivada \dot{V}_n es de la forma:

$$\dot{V}_n = -2y_n [\sigma_n(y_n + \sigma_{n-1}(y_{n-1} + \cdots + \sigma_1(y_1)) \cdots)] \quad (5.26)$$

Al cumplir la condición 1 de la definición 1, a σ_n y la condición 3 a σ_{n-1} , en donde $M_{n-1} < \frac{L_n}{2}$, entonces $\dot{V}_n < 0 \quad \forall y_n \notin Q_n \{y_n : |y_n| \leq \frac{L_n}{2}\}$.

Existirá un tiempo finito en el cual y_n pertenece y permanece en Q_n . Considerando, que debido a que el lado derecho de 5.24 es globalmente Lipschitz, los estados restantes son acotados para cualquier tiempo finito.

Ahora se considera la evolución del estado y_{n-1} . Se observa que y_n ahora es parte de Q_n , por lo cual el argumento de σ_n está acotado por:

$$|y_n + \sigma_{n-1}(y_{n-1} + \cdots + \sigma_1(y_1))| \leq \frac{L_n}{2} + M_{n-1} \leq L_n \quad (5.27)$$

En consecuencia, σ_n opera en la región lineal como se establece en la condición 2 de la definición 1. Donde la evolución de y_{n-1} está expresado por:

$$\dot{y}_{n-1} = -\sigma_{n-1}(y_{n-1} + \cdots + \sigma_1(y_1)) \quad (5.28)$$

Al utilizar el mismo razonamiento de y_n se puede demostrar que y_{n-1} pertenece y permanece en el conjunto Q_{n-1} después de un tiempo finito. Además, todo el resto de los estados permanecen acotados. Por lo que, este procedimiento puede ser utilizado para mostrar que después de un tiempo finito, el argumento de cada función σ_i se comporta como una función lineal. Como consecuencia, después de un tiempo finito, la ecuación de lazo cerrado tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{y}_1 &= -y_1 \\ \dot{y}_2 &= -y_1 - y_2 \\ &\vdots \\ \dot{y}_n &= -y_1 - y_2 - \cdots - y_n\end{aligned}\tag{5.29}$$

Por lo tanto, claramente la dinámica del sistema es exponencialmente estable después de un tiempo finito.

□

5.3 Control PD No Lineal en posición del vehículo AR2D2

En el estudio de la robótica submarina, se han propuesto dos técnicas de control no lineal: el control en modos deslizantes y el control adaptable. Las ventajas de un controlador en modos deslizantes son que trabaja directamente con los términos no lineales, es altamente robusto a modelos imprecisos y a la presencia de perturbaciones que son difíciles de medir o estimar. Por otro lado, diversos autores han propuesto controladores adaptables, ya que pueden ser una solución al problema de determinar los parámetros hidrodinámicos del robot, pues es complicado obtener estos parámetros mediante formulaciones matemáticas, además de determinarlos experimentalmente conlleva a un costo económico y de tiempo.

5.3.1 Estrategia de Control

Para el diseño del controlador, es común asumir que los parámetros hidrodinámicos inmersos en el modelo dinámico del vehículo sumergible son desconocidos. Ciertamente, estos dependen de los efectos y propiedades que son difíciles de modelar o estimar, como

la masa agregada, la fricción superficial, generación de vortices, características del fluido, etc. Por lo tanto, se propone usar un controlador PD No lineal.

Sea $u(t)$ un controlador PD, el cual se presenta en la siguiente ecuación:

$$u(t) = k_1 e(t) + k_2 \frac{de(t)}{dt} \quad (5.30)$$

Donde $e(t) = r(t) - y(t)$ es el error, $r(t)$ representa la referencia, $y(t)$ es la medición de la salida, y (k_1, k_2) son las ganancias proporcional y derivativa. En la ecuación 5.30, se puede observar que si $e(t) \rightarrow \infty$, entonces $u(t) \rightarrow \infty$; esto podría dar lugar a oscilaciones en el sistema ó en otro caso saturar los actuadores. Con el objetivo de prevenir daño a los actuadores, se propone utilizar una función de saturación en cada término de la ecuación 5.30.

Ahora, sea $\sigma_{\bar{b}_i}(k_i h_i)$ una función de saturación $\forall i=1,2$, y $\bar{b}_i, k_i > 0$, descrita en la figura 5.2 y definida como la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\bar{b}_i}(k_i h_i) = \begin{cases} \bar{b}_i & \text{si } k_i h_i > \bar{b}_i \\ k_i h_i & \text{si } |k_i h_i| \leq \bar{b}_i \\ -\bar{b}_i & \text{si } k_i h_i < -\bar{b}_i \end{cases} \quad (5.31)$$

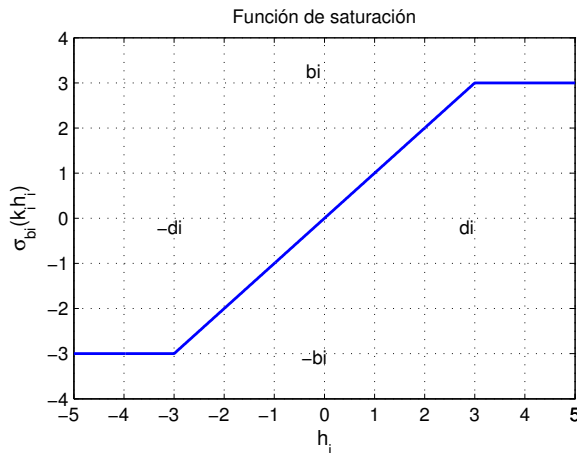


Figura 5.2: Función de saturación.

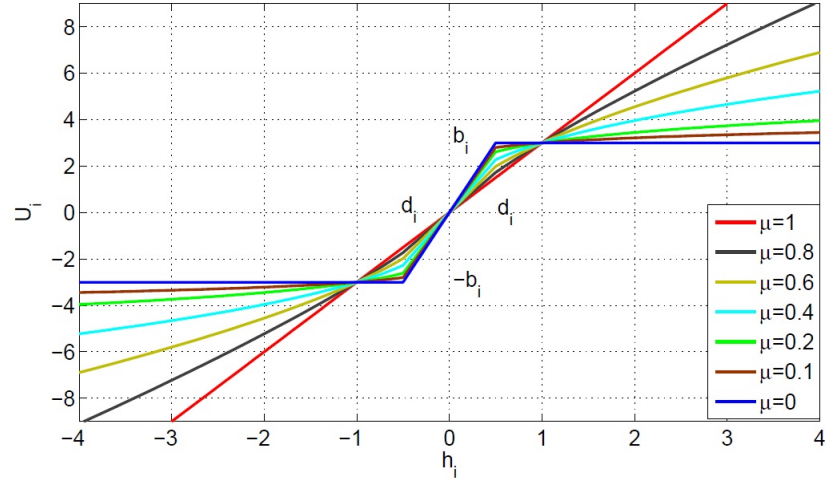


Figura 5.3: Función de saturación variable.

Un controlador PD no lineal basado en funciones de saturación.

De acuerdo a la ecuación (5.30) y (5.31), se propone un controlador PD no lineal basado en funciones de saturación como sigue:

$$u(t) = \sigma_{\bar{b}_1} [k_1 e(t)] + \sigma_{\bar{b}_2} \left[k_2 \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5.32)$$

La ecuación anterior puede representarse como:

$$u(t) = \sum_{i=1}^2 u_i \quad (5.33)$$

Donde $u_i = \sigma_{\bar{b}_i}(k_i h_i)$ representa la función de saturación, h_1 es el error y h_2 es el error derivativo. Entonces, en relación a la ecuación (5.31), se tiene:

$$u_i = \sigma_{\bar{b}_i}(k_i h_i) = \begin{cases} \bar{b}_i & \text{si } k_i h_i > \bar{b}_i \\ k_i h_i & \text{si } |k_i h_i| \leq \bar{b}_i \\ -\bar{b}_i & \text{si } k_i h_i < -\bar{b}_i \end{cases} \quad (5.34)$$

Y la ecuación anterior, puede reescribirse como:

$$u_i = \begin{cases} \text{sign}(h_i)\bar{b}_i & \text{if } |k_i h_i| > \bar{b}_i \\ k_i h_i & \text{if } |k_i h_i| \leq \bar{b}_i \end{cases} \quad (5.35)$$

En la ecuación (5.35), se puede observar que los parámetros sintonizados del controlador, los cuales son descritos por la ecuación (5.32), son las ganancias k_i y los valores de saturación \bar{b}_i , $\forall i= 1, 2$. Se observa que los parámetros sintonizados podrían ser los valores de saturación b_i y el intervalo de h_i por el cual u_i es lineal, tal que se puede elegir el valor de h_i , por el cual, se quiere saturar la ley de control. Como una consecuencia, se introducirá un nuevo parámetro, para esto se considera el punto de h_i donde $|u_i| = \bar{b}_i$, esto es:

$$|u_i| = |k_i h_i| = \bar{b}_i \implies |h_i| = \bar{b}_i/k_i \quad (5.36)$$

entonces, se define:

$$d_i := \bar{b}_i/k_i \quad (5.37)$$

como el punto donde:

$$u_i = \text{sign}(h_i)\bar{b}_i \quad \forall \quad |h_i| > d_i \quad (5.38)$$

Por lo tanto, en relación a las ecuaciones (5.37) y (5.38), se puede representar la ley de control, la cual es definida por (5.35), en términos de los parámetros b_i y d_i como sigue:

$$u_i = \begin{cases} \text{sign}(h_i)\bar{b}_i & \text{if } |h_i| > d_i \\ \bar{b}_i d_i^{-1} h_i & \text{if } |h_i| \leq d_i \end{cases} \quad (5.39)$$

En donde los parámetros sintonizados del controlador son b_i y d_i , $\forall i= 1, 2$. Con el fin de que la ecuación (5.39) sea expresada en términos de h_i cuando $|h_i| > d_i$, se tiene que:

$$\text{sign}(h_i)\bar{b}_i = h_i \text{sign}(h_i)\bar{b}_i h_i^{-1} \quad (5.40)$$

entonces:

$$\text{sign}(h_i)\bar{b}_i = |h_i|\bar{b}_ih_i^{-1} \quad (5.41)$$

y tomando en cuenta que $|h_i|h_i^{-1} = |h_i|^{-1}h_i$, entonces la ecuación (5.39) puede ser reescrita como:

$$u_i = \begin{cases} \bar{b}_i|h_i|^{-1}h_i & \text{if } |h_i| > d_i \\ \bar{b}_id_i^{-1}h_i & \text{if } |h_i| \leq d_i \end{cases} \quad (5.42)$$

Finalmente, la ley de control definida por la ecuación (5.32) puede representarse como:

$$u(t) = u_1 + u_2 = k_p(e)e(t) + k_d(\dot{e})\dot{e}(t) \quad (5.43)$$

con

$$k_p(e) = \begin{cases} \bar{b}_1|e(t)|^{-1} & \text{if } |e(t)| > d_1 \\ \bar{b}_1d_1^{-1} & \text{if } |e(t)| \leq d_1 \end{cases} \quad (5.44)$$

$$k_d(\dot{e}) = \begin{cases} \bar{b}_2|\dot{e}(t)|^{-1} & \text{if } |\dot{e}(t)| > d_2 \\ \bar{b}_2d_2^{-1} & \text{if } |\dot{e}(t)| \leq d_2 \end{cases} \quad (5.45)$$

La ventaja de este controlador es que las máximas fuerzas y pares son seleccionados por los parámetros \bar{b}_1 y \bar{b}_2 . De tal manera, que se tiene seguro que los actuadores no se perjudicarán, pero en otros casos es necesario que las fuerzas y pares sean ligeramente más grandes para corregir el error del sistema.

5.3.2 Análisis de Estabilidad

Considerando las ecuaciones (4.1) y (4.5), se propone la siguiente entrada de control:

$$\tau = g(\eta) - J^T(\eta)\tau_{NPD} \quad (5.46)$$

con

$$\tau_{NPD} = \sigma_{\bar{b}_p} [k_p e(t)] + \sigma_{\bar{b}_d} [k_d(\dot{e}(t))] \quad (5.47)$$

La ecuación anterior puede ser reescrita como:

$$\tau_{NPD} = K_p(\cdot)e(t) + K_d(\cdot)\dot{e}(t) \quad (5.48)$$

con

$$K_p(\cdot) = \begin{bmatrix} K_{p_1}(\cdot) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{p_2}(\cdot) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{p_n}(\cdot) \end{bmatrix} > 0 \quad (5.49)$$

$$K_d(\cdot) = \begin{bmatrix} K_{d_1}(\cdot) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{d_2}(\cdot) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{d_n}(\cdot) \end{bmatrix} > 0 \quad (5.50)$$

Donde

$$k_{p_i} = \begin{cases} \bar{b}_{p_i} |e_i(t)|^{-1} & \text{if } |e_i(t)| > d_{p_i} \\ \bar{b}_{p_i} d_{p_i}^{-1} & \text{if } |e_i(t)| \leq d_{p_i} \end{cases} \quad (5.51)$$

$$k_{d_i} = \begin{cases} \bar{b}_{d_i} |\dot{e}_i(t)|^{-1} & \text{if } |\dot{e}_i(t)| > d_{d_i} \\ \bar{b}_{d_i} d_{d_i}^{-1} & \text{if } |\dot{e}_i(t)| \leq d_{d_i} \end{cases} \quad (5.52)$$

Para el caso de regulación, se tiene:

$$\eta_d = cte \implies \dot{\eta} = 0 \quad (5.53)$$

Asumiendo que

$$e = \eta - \eta_d \implies \dot{e} = \dot{\eta} \quad (5.54)$$

Entonces, la ecuación (5.46), puede reescribirse como:

$$\tau = g(\eta) - J^T(\eta) [K_p(e)e + K_d(\dot{e})\dot{\eta}] \quad (5.55)$$

Ahora, se tiene el sistema en lazo cerrado como sigue:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = -J^T(\eta) [K_p(e)e + K_d(\dot{e})\dot{\eta}] \quad (5.56)$$

Tomando en cuenta la ecuación (??), se tiene:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = -J^T(\eta) [K_p(e)e + K_d(\dot{e})J(\eta)\nu] \quad (5.57)$$

Se define $K_{dd}(\eta, \dot{e}) = J^T(\eta)K_d(\dot{e})J(\eta)$, de manera que la ecuación previa puede reescribirse como:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = -J^T(\eta)K_p(e)e - K_{dd}(\eta, \dot{e})\nu \quad (5.58)$$

Reescribiendo la ecuación anterior, se tiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \nu \end{bmatrix} = \quad (5.59)$$

$$\begin{bmatrix} J(\eta)\nu \\ M^{-1} [J^T(\eta)K_p(e)e - K_{dd}(\eta, \dot{e})\nu - C(\nu)\nu - D(\nu)\nu] \end{bmatrix} \quad (5.60)$$

Observe que el único punto de equilibrio es el origen. Ahora, se puede proponer la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(e, \nu) = \frac{1}{2}\nu^T M\nu + \int_0^e \xi^T K_p(\xi) d\xi \quad (5.61)$$

De acuerdo al Lema 2 de [1], se tiene que $V(e, \nu)$ es una función definida positiva globalmente y radialmente desacotada. La derivada de la función candidata de Lyapunov es:

$$\dot{V}(e, \nu) = \nu^T M \dot{\nu} - e^T K_p(e) J(\eta) \nu \quad (5.62)$$

Mediante la sustitución de la ecuación en lazo cerrado (5.58) dentro (5.62), se obtiene:

$$\dot{V}(e, \nu) = \nu^T J^T(\eta) K_p(e) e - \nu^T K_{dd}(\eta, \dot{e}) \nu - \nu^T C(\nu) \nu \quad (5.63)$$

$$- \nu^T D(\nu) \nu - e^T K_p(e) J(\eta) \nu$$

Ya que $K_p(e) = K_p^T(e)$ y $C(\nu) = -C(\nu)^T$, la ecuación (5.63) se convierte en:

$$\dot{V}(e, \nu) = -\nu^T [K_{dd}(\eta, \dot{e}) + D(\nu)] \nu \quad (5.64)$$

Asumiendo que $D(\nu) > 0$ y recordando que $K_d > 0 \rightarrow K_{dd} > 0$ siendo matriz simétrica, entonces se obtiene que $\dot{V}(e, \nu)$ es una función globalmente semidefinida negativa, y por lo tanto, se concluye estabilidad del punto de equilibrio. Con el fin de probar estabilidad asintótica, se aplica el Teorema de LaSalle-Krasovskii, de manera que:

$$\Omega = \left[\left[\begin{array}{c} e \\ \nu \end{array} \right] = \dot{V}(e, \nu) = 0 \right] = \left[\left[\begin{array}{c} e \\ \nu \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} e \\ 0 \end{array} \right] \in R^{2n} \right] \quad (5.65)$$

Introduciendo $\nu = 0$ y $\dot{\nu} = 0$ dentro la ecuación (5.58), se tiene $e = 0$, por lo tanto, se concluye que el punto de equilibrio es globalmente y asintóticamente estable.

Capítulo 6

Simulación y Resultados Experimentales

6.1 Resultados del prototipo Tritón

En este apartado se realizó la implementación de leyes de control en el prototipo Tritón para observar el mejor comportamiento de la orientación en ángulo yaw, una vez que fueron sintonizadas, es decir, se hace una comparación de las leyes de control; PD, PID y PD Saturado. De tal manera que en los siguientes gráficos se muestran los resultados.

En las imágenes 6.1 y 6.2 se presentan los gráficos de la mejor sintonización del controlador PD aplicado al vehículo para obtener control en yaw. Como puede notarse en ambas figuras, es evidente que se requiere la parte integral del controlador para corregir el error en estado estacionario. Sin embargo en la figura 6.2 se obtiene un mejor comportamiento, ya que la referencia es de 280° . Para este caso las ganancias del controlador correspondiente equivalen a $k_p = 4$ y $k_d = 0.4$. Mientras que las ganancias correspondientes del controlador aplicado en relación a la imagen 6.1 equivalen a $k_p = 3$ y $k_d = 0.8$.

Ahora bien, se desea implementar un controlador PID en heading del vehículo, dándole

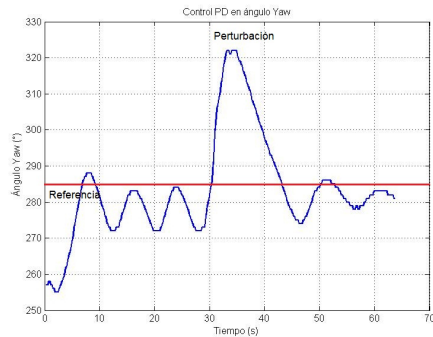


Figura 6.1: PD sintonizado.

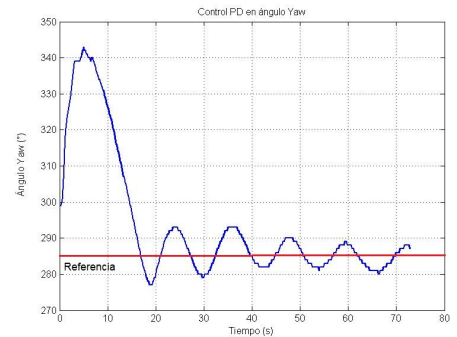


Figura 6.2: PD con sintonización mejorada.

como consigna la misma referencia de 280° , como se puede observar en las imágenes 6.3 y 6.4, se logra alcanzar la referencia con la sintonización pero como en este controlador, se integra el error, tarda un poco más en hacerlo. Las ganancias correspondientes de acuerdo al comportamiento de la figura 6.3 equivalen a $k_p = 5$, $k_d = 0.4$ y $k_i = 0.7$, mientras que las ganancias que corresponden al comportamiento de la figura 6.4 son $k_p = 3$, $k_d = 0.5$ y $k_i = 0.7$.

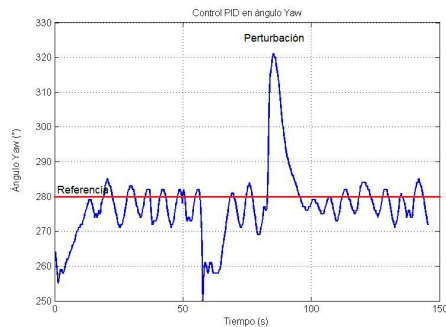


Figura 6.3: PID sintonizado.

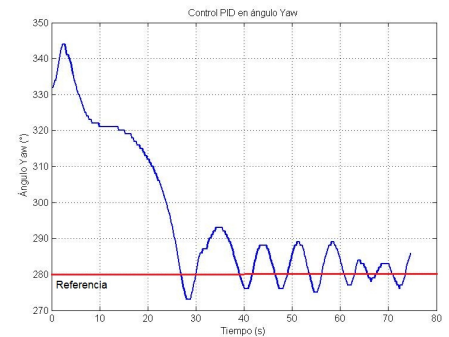


Figura 6.4: PID con sintonización mejorada.

En las imágenes 6.5 y 6.6 se presenta el comportamiento del vehículo con la aplicación de un controlador PD Saturado, con referencia de 280° . Es evidente que la saturación en este tipo de controlador permite obtener una mejor respuesta al alcanzar la referencia.

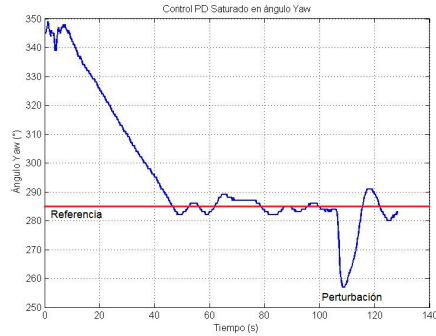


Figura 6.5: PD Saturado sintonizado.

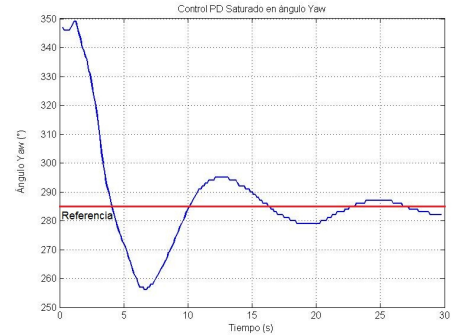


Figura 6.6: PD Saturado con otra sintonización.

Como se puede notar en la imagen 6.5, se logró obtener una buena sintonización, cuyas ganancias corresponden a una ganancia proporcional $k_p = 4$ y ganancia derivativa $k_d = 0.4$. Mientras que en la imagen 6.6, se cambió un poco la sintonización de dicho controlador aumentando un poco más la ganancia proporcional $k_p = 5$, con la misma ganancia derivativa $k_d = 0.4$.

Por lo tanto, una vez que se encontró un buen controlador para este experimento, es decir, la implementación del control PD Saturado con sus ganancias correspondientes, ahora se le programó al vehículo una rutina, en donde se proporcionan dos referencias, una de ellas equivalente a 4.6 radianes y la otra de 1.4 radianes, tal y como se muestra en la figura 6.7, es evidente que se efectúa mejor el control en un sentido (260°) que en el otro sentido (80°), esto fue debido a que el cable de alimentación provocaba un tironeo en el vehículo mientras se realizaba el experimento.

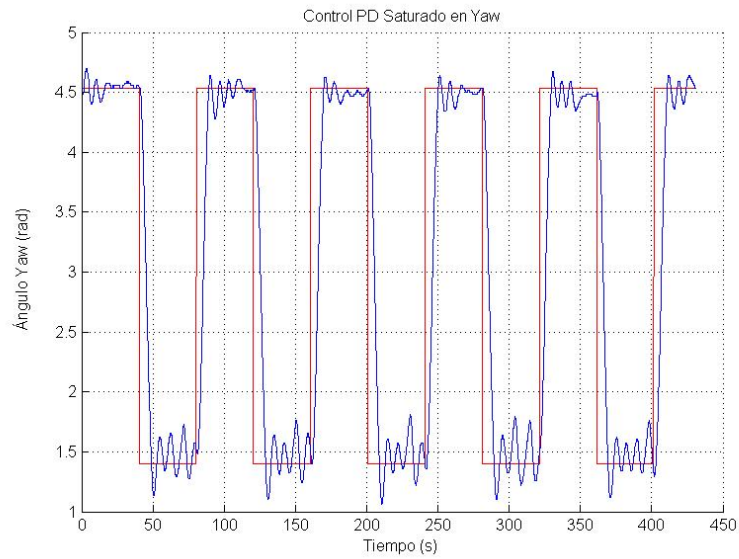
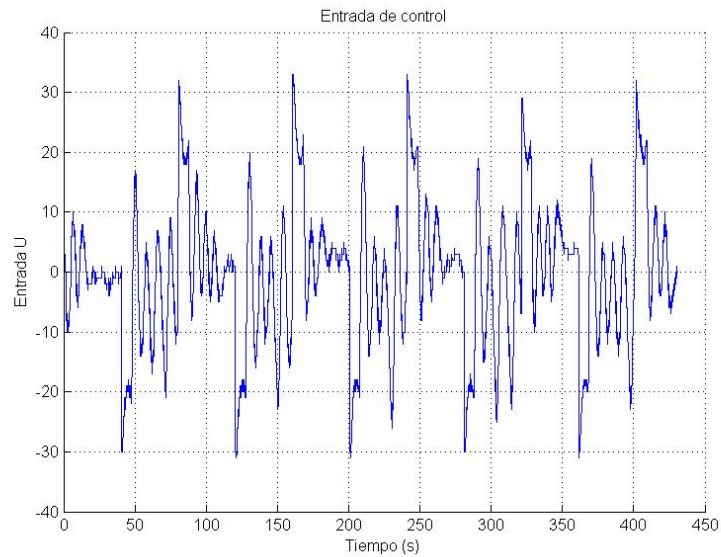


Figura 6.7: Control PD Saturado en ángulo Yaw.

Como complemento, en la imagen 6.8, se presenta la señal de entrada de control U efectuada en los actuadores, mientras se realizaba el mismo experimento.

Figura 6.8: Entrada de Control U .

Finalmente, en las imágenes 6.9 y 6.10, se presenta la señal PWM (Modulación por Ancho de Pulso) para el control de los motores de CD, de dicho experimento.

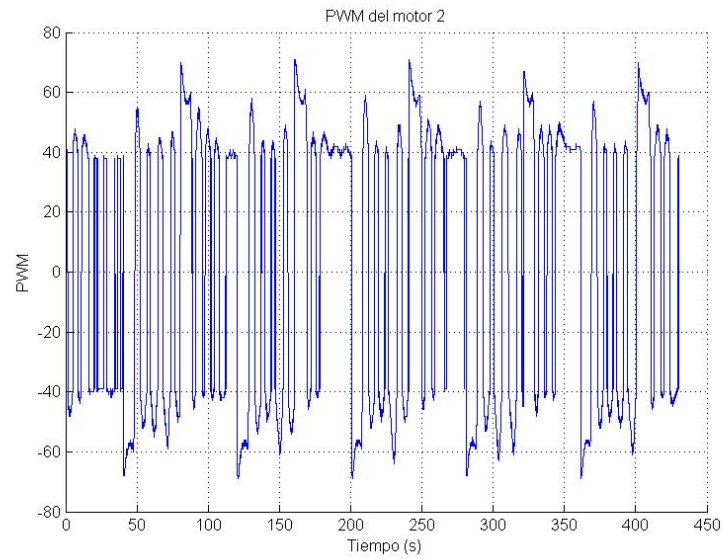


Figura 6.9: PWM en motor 2.

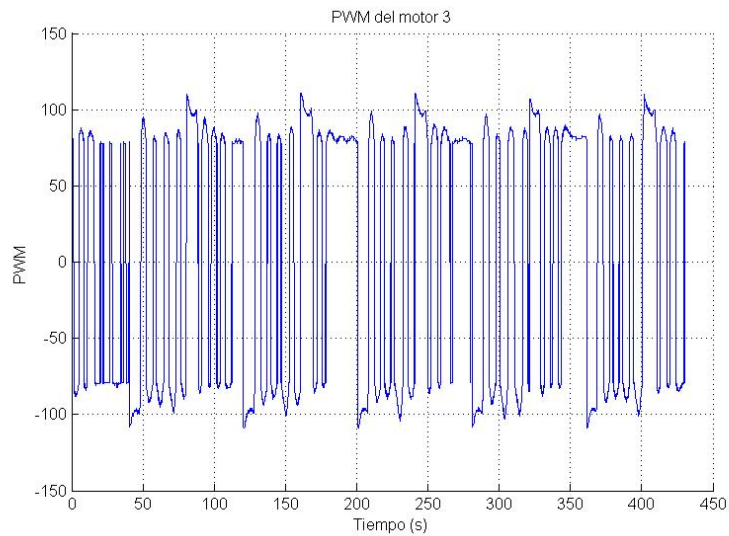


Figura 6.10: PWM en motor 3.

6.2 Resultados del prototipo Cookie ROV

6.2.1 Simulación

Se utiliza Simulink de MatLab para probar las leyes de control seleccionadas en la estabilidad de la posición angular yaw sobre las ecuaciones del modelo dinámico.

Se presentan los resultados de la simulación con el objetivo de verificar el desempeño de la dinámica en yaw, utilizando las leyes de control PD, PID y PD saturado para realizar una comparación y seleccionar la que mejor desempeño efectúe en el sistema. En la figura 6.13 se muestra la respuesta del sistema al implementar un controlador PD y someterlo a perturbaciones del tipo escalón. Las ganancias correspondientes equivalen a; $K_p=0.8$ y $K_d=0.5$, mientras que en el gráfico de la figura 6.11 se presenta la respuesta del sistema mediante un controlador PID, con la entrada de control τ_ψ (ver figura 6.12), cuyas ganancias equivalen a: $K_p= 1.8$, $K_d= 1.5$ y $K_i=1.2$, es notable que se puede mejorar la estabilidad a través de la sintonización. Para el caso del controlador PD saturado, éste fue sintonizado de igual manera para observar el comportamiento frente a perturbaciones, la evolución del tiempo en la posición angular (yaw) se muestra en la figura (6.15) y la entrada de control τ_ψ correspondiente (ver figura 6.16), las ganancias equivalen a; $K_p=1.5$ y $K_d=0.8$. Observe que para mejorar la estabilidad, se puede sintonizar con más precisión, considerando la característica que tiene este controlador, de permitir saturar la entrada de control y proteger a los actuadores. Los resultados experimentales se presentan en las imágenes (6.17, 6.18 y 6.19), donde es notable que el controlador PD saturado brinda una mejor estabilidad. Cabe mencionar que éste fue sintonizado para conseguir el mejor desempeño.

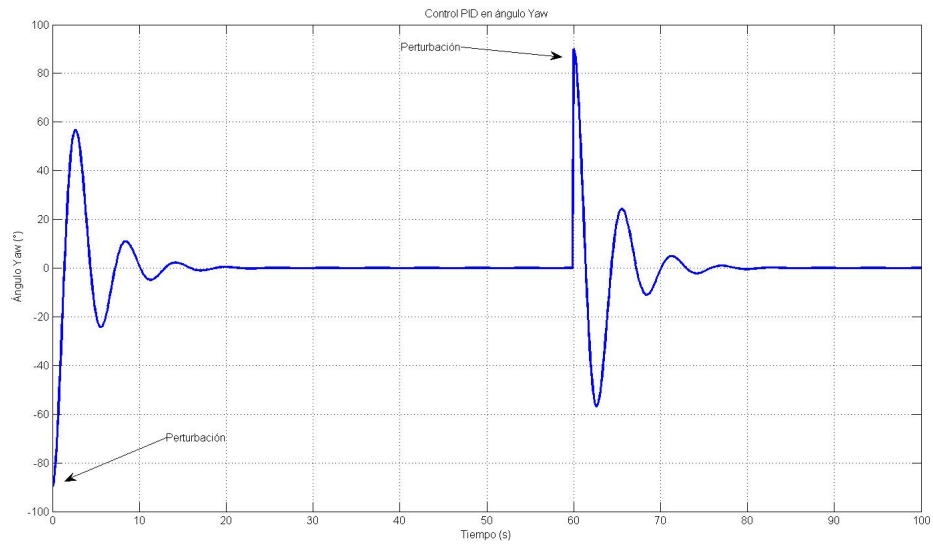


Figura 6.11: Control PID en yaw (simulación).

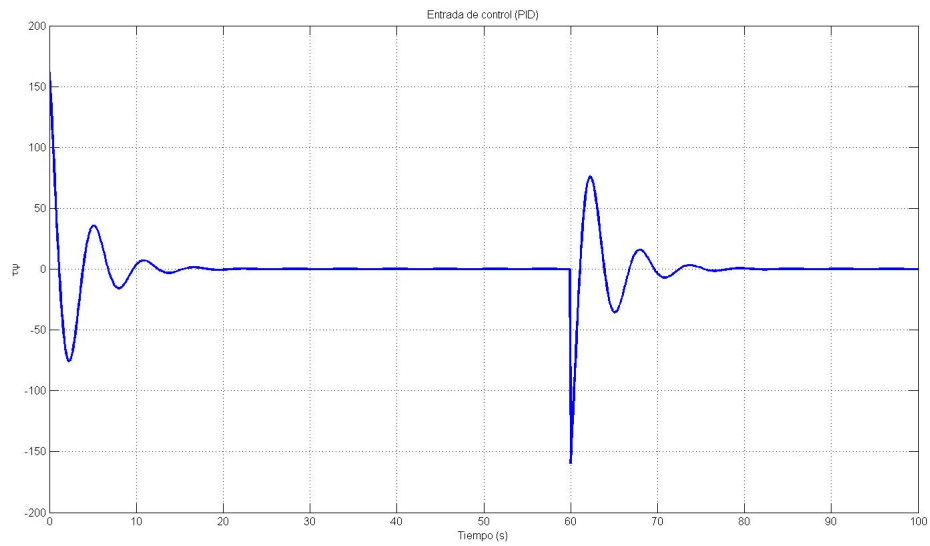


Figura 6.12: Entrada de control τ_ψ para el control PID.

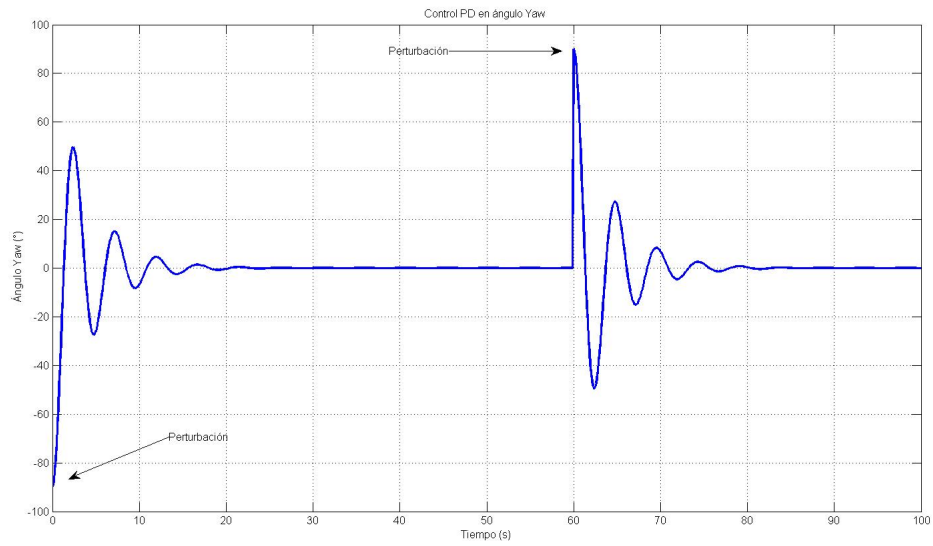


Figura 6.13: Control PD en yaw (simulación).

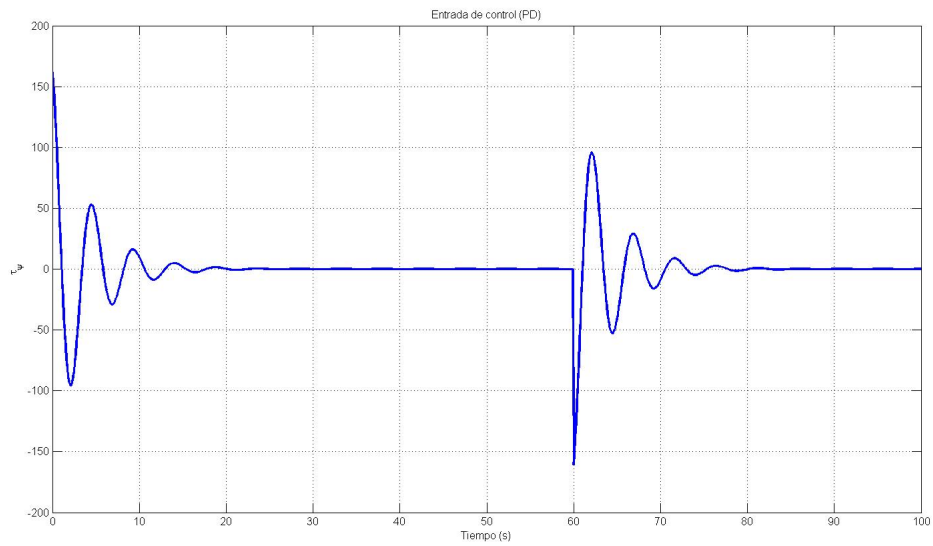


Figura 6.14: Entrada de control τ_ψ para el control PD.

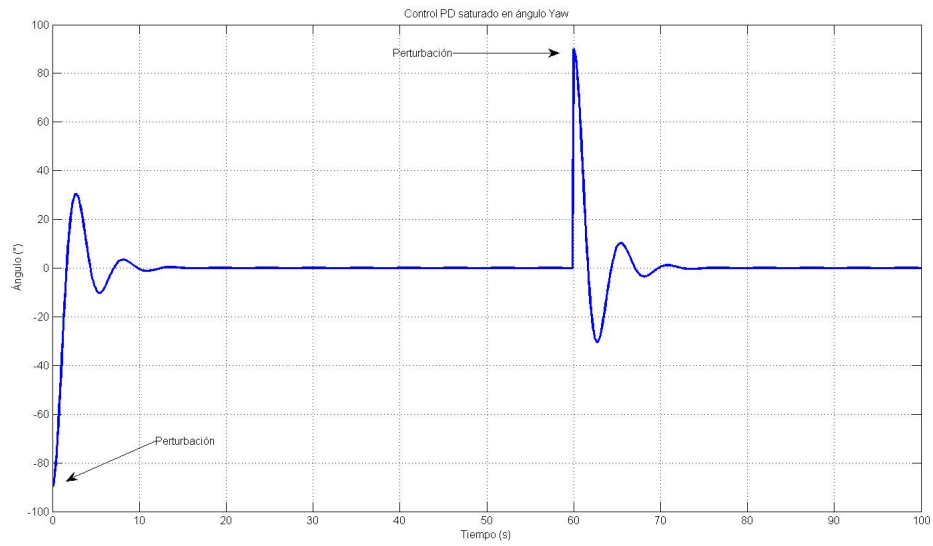


Figura 6.15: Control PD saturado en yaw (simulación).

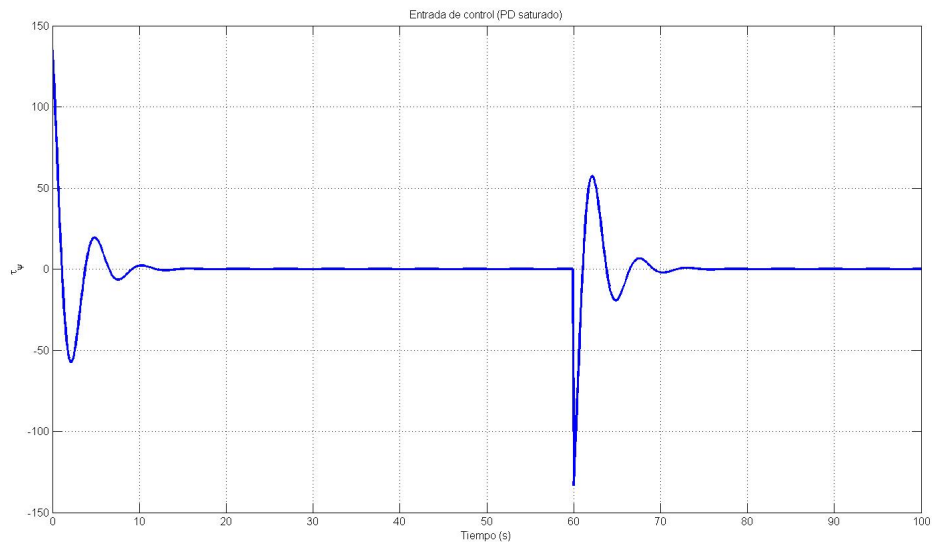


Figura 6.16: Entrada de control τ_ψ para el control PD saturado.

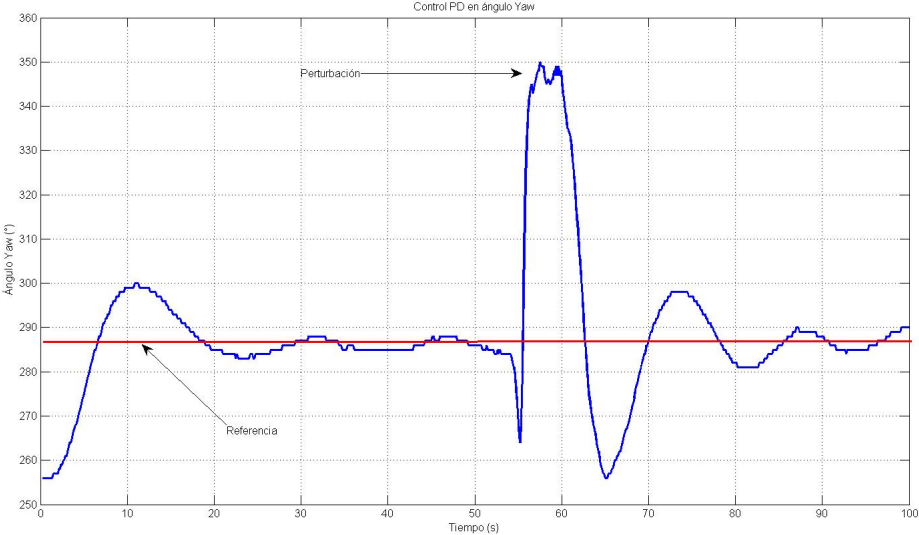


Figura 6.17: Sintonización experimental del Control PD (yaw).

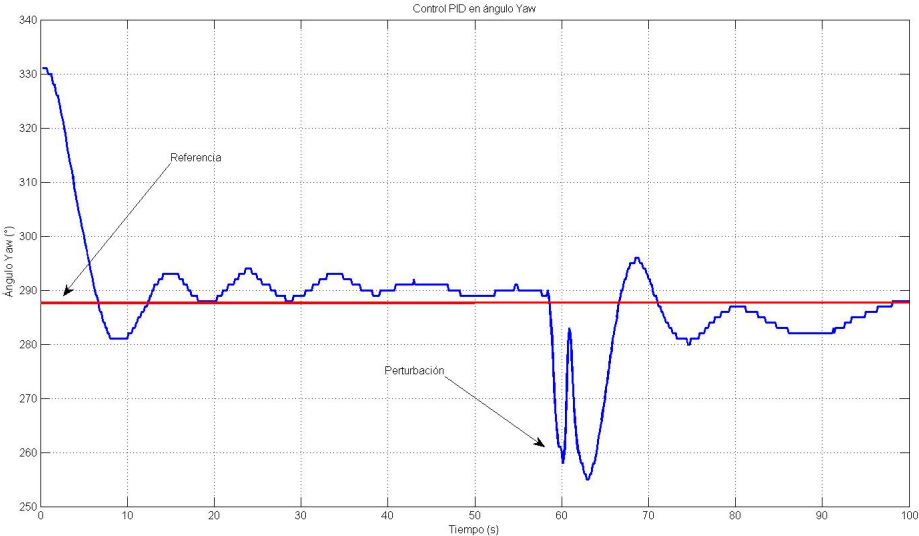


Figura 6.18: Sintonización experimental del Control PID (yaw).

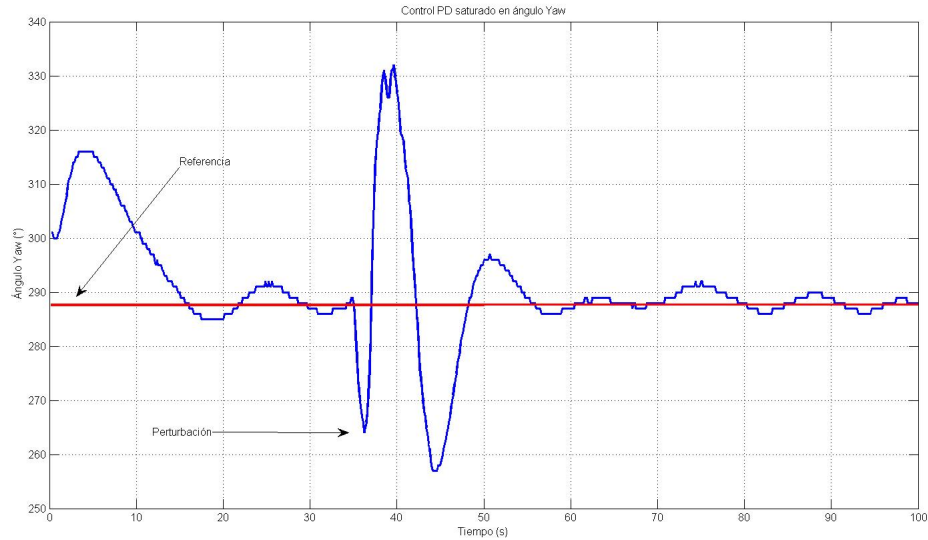


Figura 6.19: Sintonización experimental del Control PD saturado (yaw).

6.3 Resultados del prototipo AR2D2

6.3.1 Simulación

Se ha utilizado Simulink de MatLab para aplicar la ley de control seleccionada en la estabilidad de la posición (x,z) , sobre las ecuaciones del modelo dinámico. La figura (6.20) muestra el diagrama del modelo dinámico. La simulación se realizó considerando el sistema en lazo cerrado, cuyas entradas de control dependen de los controladores PD no lineales implementados tanto para el avance como para el viraje. Las figuras (6.21), (6.22) son los bloques realizados en Simulink que representan los controladores PD no lineales aplicados sobre la dinámica en (x,z) .

La entrada de control U_1 es directamente aplicada sobre las fuerzas verticales y la entrada de control U_2 es aplicada sobre las fuerzas horizontales. Los gráficos de las figuras (6.23) y (6.24) muestran ambas entradas de control. Se puede notar que la entrada de control U_1 converge al valor del peso $f_W = 1$, asignado como se muestra en la figura 6.22, mientras que en la entrada de control U_2 converge a cero, debido sólo a

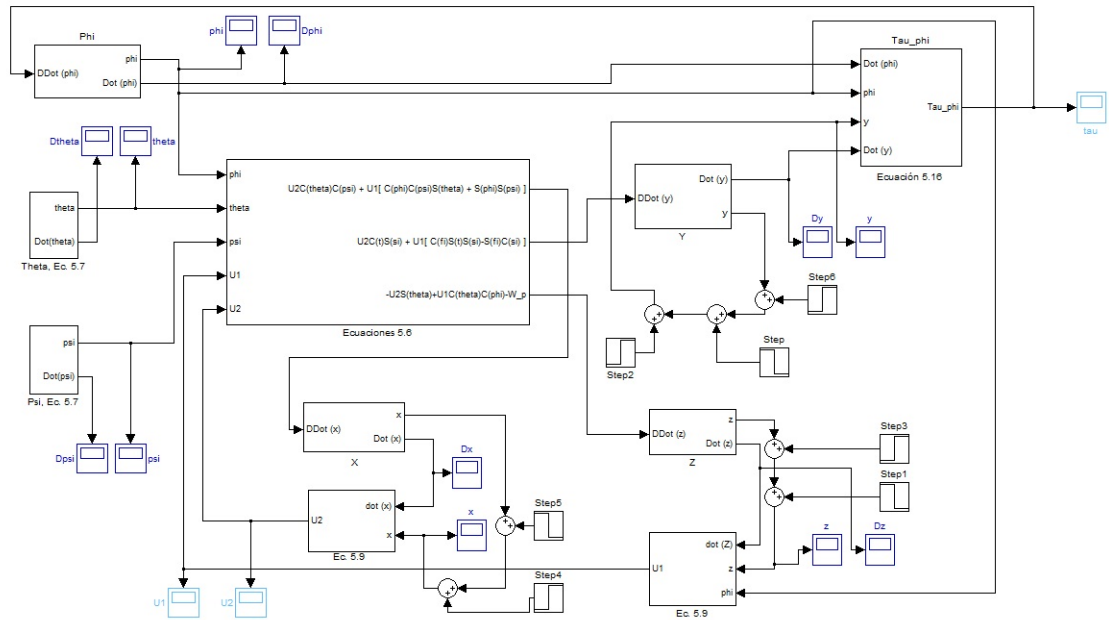


Figura 6.20: Modelo Dinámico en simulink.

Control PD No lineal (Avance)

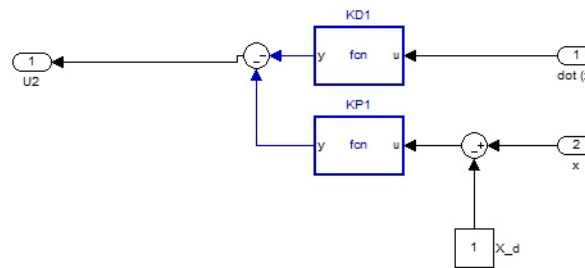


Figura 6.21: Control PD no lineal con función de saturación constante en x.

la combinación de las fuerzas horizontales.

Los resultados de la simulación son presentados con el objetivo de observar el desempeño de la traslación (x,z) del AUV, utilizando la ley de control propuesta. El controlador PD no lineal fue sintonizado para obtener el mejor comportamiento contra perturbaciones, cuyas funciones de saturación en las ganancias proporcional y derivativa para el control

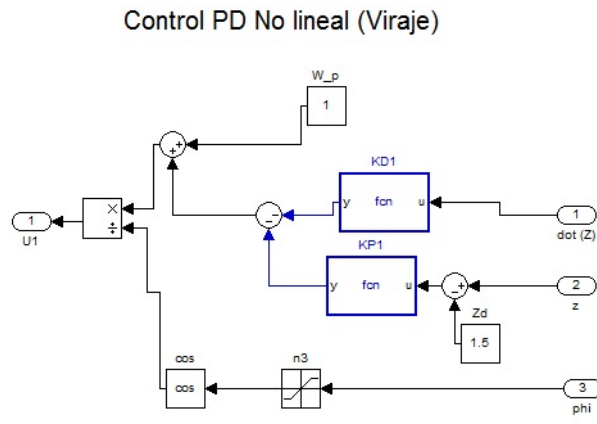


Figura 6.22: Control PD no lineal con función de saturación constante en z

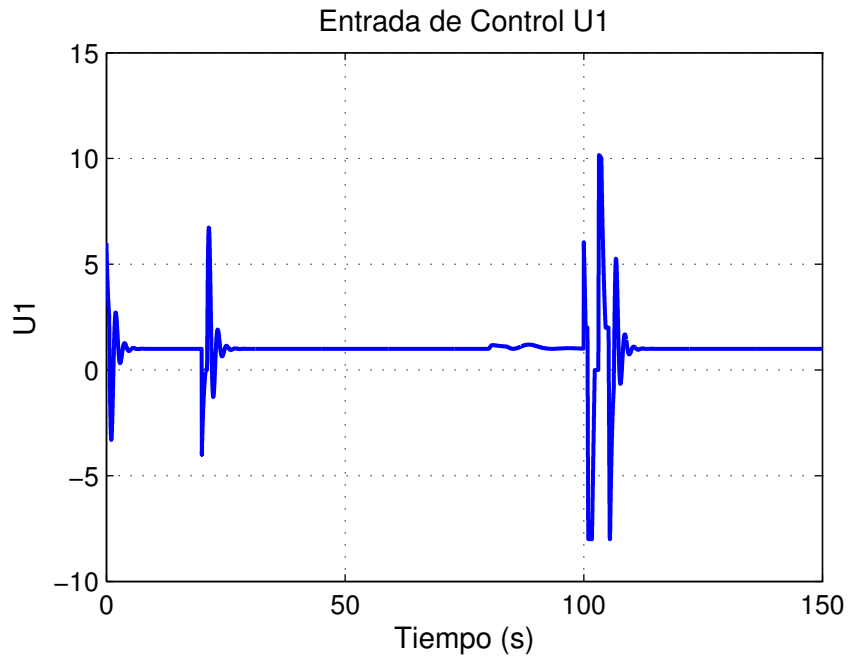


Figura 6.23: Entrada de Control U1.

en avance y viraje, corresponden a los valores de $b=+-4$ y $d=+-2$, de tal manera que la evolución del tiempo sobre la posición x del vehículo, es mostrada en la figura (6.25), mientras que la respuesta sobre la posición z del sistema en lazo cerrado es presentada en la figura (6.26). Note que las variables de estado (x,z) son externamente perturbadas

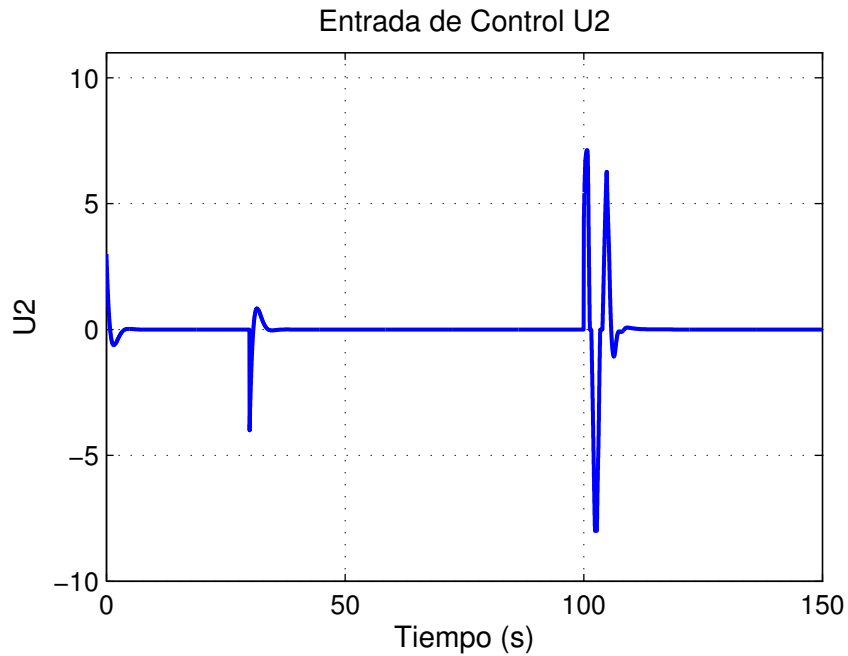


Figura 6.24: Entrada de Control U_2 .

y el control PD no lineal es aún capaz de estabilizar la posición. Las condiciones iniciales utilizadas para esta simulación son $x(0) = 0$, $z(0) = 0$, $\dot{x}(0) = 0$, $\dot{z}(0) = 0$ y los valores deseados son $x_d = 1.5$ y $z_d = 1$.

En las figuras 6.27 y 6.28, se presentan los gráficos de las velocidades correspondientes en el desplazamiento (x,z) , en donde se puede observar el comportamiento derivativo del sistema en lazo cerrado, contra el efecto de las perturbaciones aplicadas. De tal manera que la velocidad es nula cuando el vehículo ha alcanzado los valores de deseados en la posición (x,z) .

Los gráficos de los resultados experimentales se presentan en las imágenes (6.29) y (6.30), en donde se puede notar que la ley de control propuesta, tiene un buen desempeño. La sintonización fue ajustada tanto para conseguir el mejor comportamiento del micro submarino sometido a perturbaciones externas. Observe que para mejorar la estabilidad, se puede sintonizar con más precisión, considerando la característica que tiene este controlador, de permitir saturar la entrada de control y proteger a los actuadores.

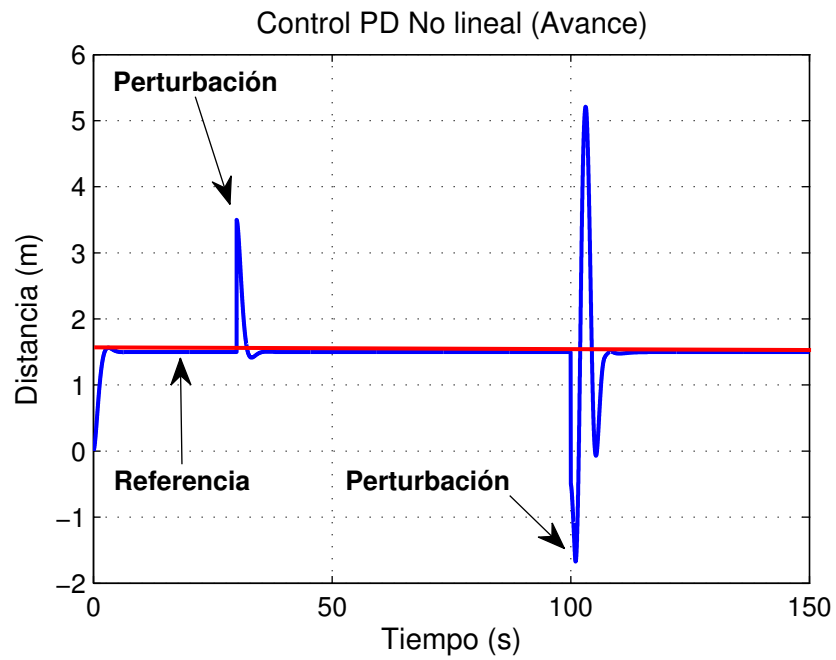


Figura 6.25: Posición en x (avance).

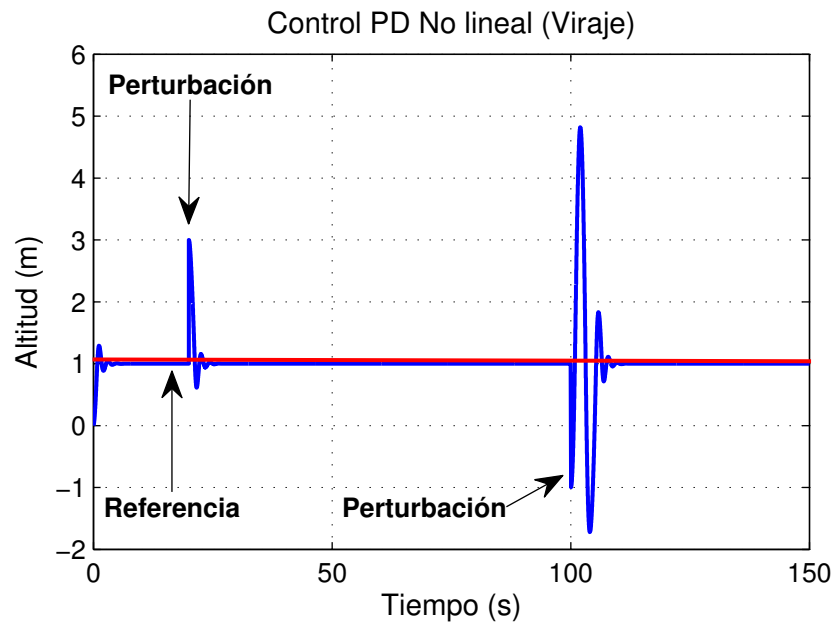


Figura 6.26: Posición en z (viraje).

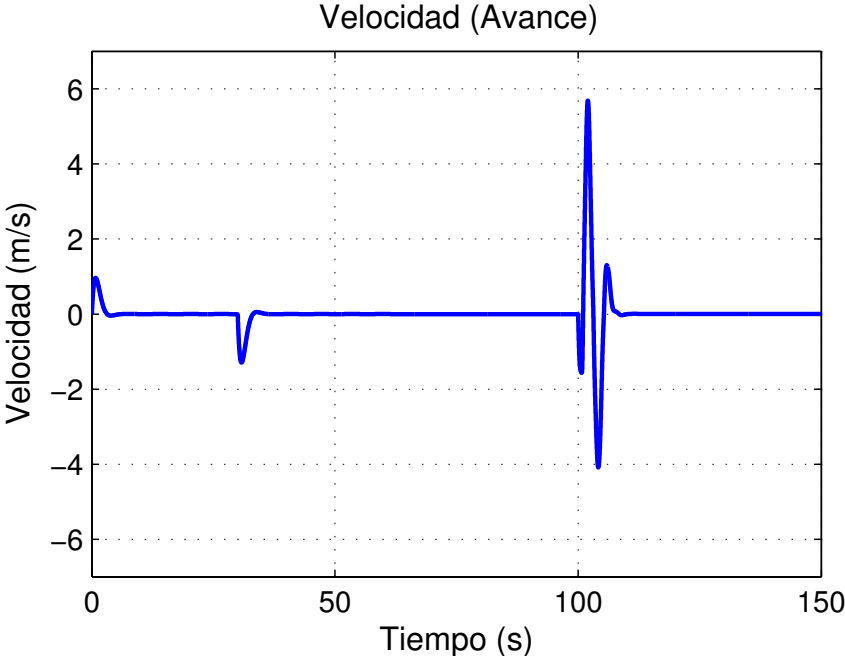


Figura 6.27: Velocidad en el avance.

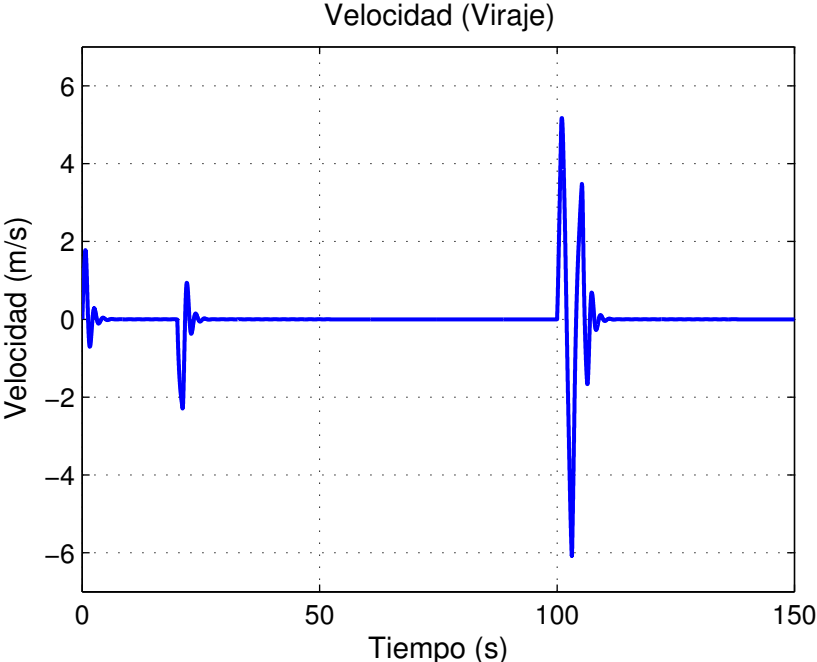


Figura 6.28: Velocidad en el viraje.

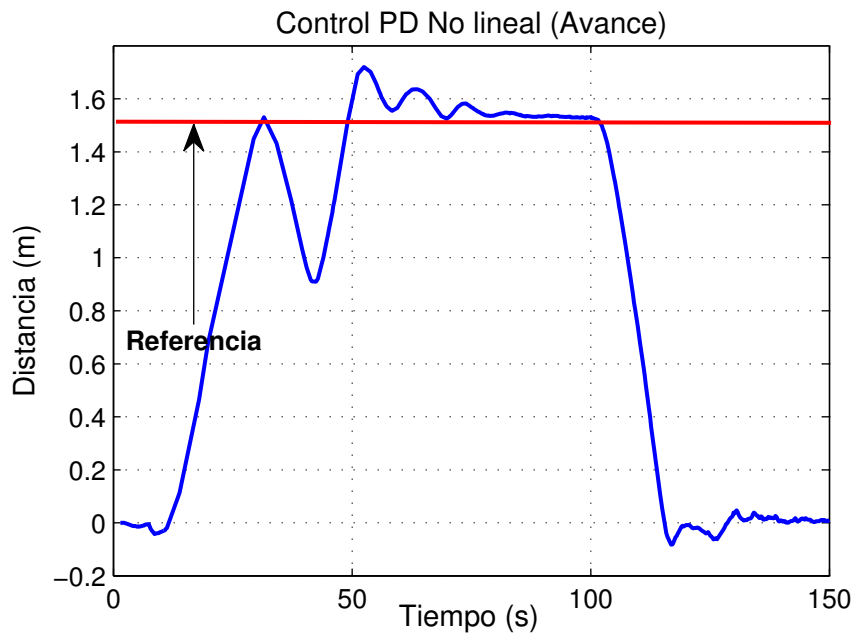


Figura 6.29: Posición experimental en x (avance).

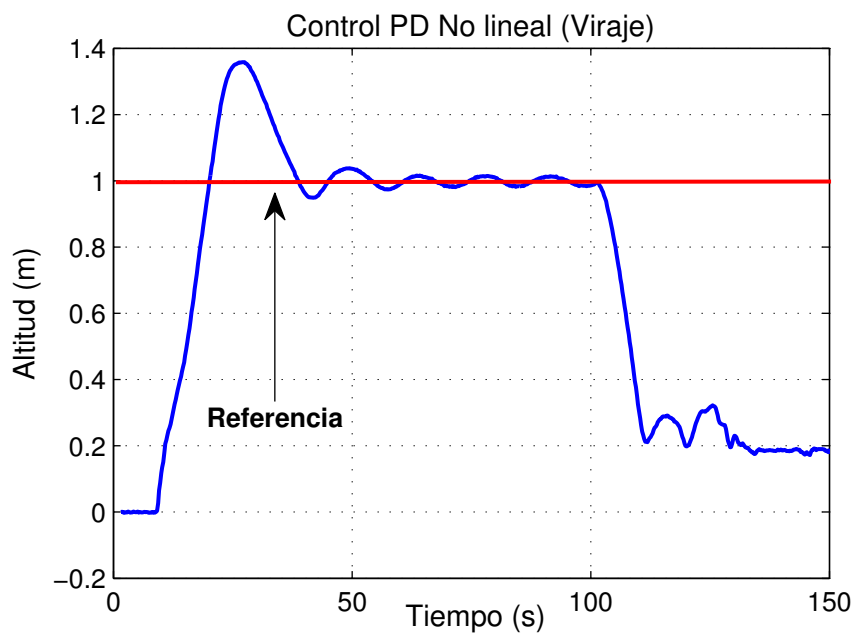


Figura 6.30: Posición experimental en z (viraje).

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo Futuro

El desarrollo de este trabajo de tesis fue motivado por la necesidad de tener vehículos autónomos de pequeña escala para aplicaciones en ambientes cerrados. Se considera el problema de regulación tanto para la orientación como para la posición, con la finalidad de manejar estos vehículos en espacios reducidos, cerrados e irregulares, así como; inspección en estanques de almacenamiento nuclear, en instalaciones de tratamiento de agua residual y estudio de ecosistemas en cavernas acuáticas, entre otras, ya que estos ambientes difieren del océano en relación a sus dimensiones. El desacoplamiento dinámico del oleaje (roll) y balanceo (pitch) resultó ser un tema clave. Los sistemas integrados de navegación se redujeron tanto como fue posible, de un lado uno se limita a trabajar en áreas cerradas y por otro lado se está buscando tareas de cooperación como el principal objetivo de un trabajo futuro de investigación [23].

Esta tesis, incluye un estudio de los principales campos que entran en la concepción de este tipo de robots, tales como: diseño mecánico y electrónico, modelado dinámico, informática y sistemas de control. Cabe señalar que muchos de los conceptos que se presentan en este escrito, se han validado de forma experimental.

El escrito comienza con la descripción del modelo matemático de vehículos submarinos, así como el modelo cinemático y dinámico, además de que se utiliza la representación SNAME para dicho modelo. Se detalla el análisis de las fuerzas hidrodinámicas y pares aplicados al vehículo, incluyendo la masa agregada, el amortiguamiento hidrodinámico, las fuerzas de restitución y los pares correspondientes. Algunas simplificaciones basadas en la geometría de los vehículos permiten reducir la complejidad global del modelo. El modelo dinámico obtenido se utiliza posteriormente para efectuar las leyes de control.

En el siguiente capítulo se presenta el diseño y modelado de los prototipos micro submarinos desarrollados en el laboratorio, tomando en cuenta la estructura y geometría de los vehículos para definir su dinámica.

Las leyes de control aplicadas (PID, PD y PD Saturado) en la orientación del vehículo Tritón y Cookie ROV, fueron validadas mediante experimentos en una piscina, además de observar el mejor comportamiento de la orientación en ángulo yaw, una vez que las leyes de control fueron sintonizadas. También se hace una comparación de estas leyes implementadas para seleccionar la mejor ley de control desempeñada en cada vehículo. Para el caso del vehículo AR2D2, se implementó una ley de control PD no lineal para el control de avance y profundidad. Por lo tanto, se demostró la estabilidad en lazo cerrado mediante la teoría básica de Lyapunov.

En la sección de resultados se muestran los gráficos de resultados experimentales obtenidos de la mejor sintonización del controlador aplicado en el prototipo Tritón y Cookie ROV, mientras que en el prototipo AR2D2 se presentan los gráficos de resultados de simulación y experimentales de la ley de control implementada.

Por lo tanto, la construcción de los prototipos fue desarrollada exitosamente en el laboratorio UMI LAFMIA del Cinvestav. Se desarrollaron prototipos de pequeña escala de bajo costo con sistemas embebidos basados en Linux para efectuar los algoritmos de

control propuestos. Se implementó un sistema ultrasónico de bajo costo para efectuar el control en posición del prototipo AR2D2. La comparación de estrategias de control PD, PD saturado y PID, permitió seleccionar el controlador más adecuado para el control en yaw del prototipo Tritón y Cookie ROV. Para control en orientación, sólo se realiza control en ángulo yaw, ya que la geometría de los vehículos facilita la calibración del peso y la flotabilidad para obtener estabilidad en lazo abierto de los ángulos roll y pitch. Se propone un controlador PD no lineal para el control en posición del prototipo AR2D2, el cual demostró resultados satisfactorios en la regulación. Se contribuyó en un avance más en el desarrollo de μ AUVs para realizar aplicaciones de control automático.

Bibliografía

- [1] Watson Simon A. and Green Peter N. (2014) *Depth Control for Micro-autonomous Underwater Vehicles (μ AUVs): Simulation and Experimentation*. International Journal of Advanced Robotic Systems, DOI: 10.5772/57334.
- [2] Watson Simon A. and Green Peter N. (2011) *A De-Coupled Vertical Controller for Micro-Autonomous Underwater Vehicles (μ AUVs)*. International Conference on Mechatronics and Automation 2011, pp 561-566.
- [3] Sascha Fechner, Jochen Kerdels, Jan Albiez, and Frank (2007) *Design of a μ AUV*. Conference: Proceedings of the 4th International AMiRE Symposium (AMiRE-2007).
- [4] K. Berns, T. Luksch(2007) *Sensor Proccessing and Behaviour Control of a Small AUV*. Autonome Mobile Systeme 2007. Springer Berlin Heidelberg New York. pp 327-331.
- [5] Brett Hobson, Bryan Schulz, Jason Janét, Mathieu Kemp, Ryan Moody, Chuck Pell, Heather Pinnix *Development of a Micro Autonomous Underwater Vehicle For Complex 3-D Sensing* Nekton Research, LLC.
- [6] Antonelli, G., Fossen, T. I., and Yoerger, D. R. (2008). *Underwater Robotics*. In Siciliano, B. and Khatib, O., editors, Springer Handbook of Robotics, chapter 44, pp 987-108. Spring Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- [7] Héctor A. Moreno, Roque Salterén, Lisandro Puglisi, Isela Carrera, Pedro Cárdenas, César Álvarez (2014) *Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Noviembre 2014 pp 3-19.
- [8] Eduardo Campos Mercado. *Desing, modelling and control of AUVs using Articial Vision*. Doctoral thesis was deliverated by Montpellier University II, LIRMM, Diciembre 2014.
- [9] U.R. Zimmer (2006) *The Australian National University - Information Engineering - Serafina Website. The Australian National University*. [Online]. Available: <http://serafina.anu.edu.au/>
- [10] P. Rodríguez, J. Piera *Mini AUV, a platform for future use on marine research for the Spanish Research Council?* Instrumentation ViewPoint 2005.
- [11] Fan et al.(2001)Fan, and Balasuriya Y. Fan and A. Balasuriya. *Optical flow based speed estimation in AUV target tracking*. IEEE Conference and Exhibition Oceans, vol. 4, 2001.
- [12] Kleeman(2003) *Advanced Sonar and Odometry Error Modeling for Simultaneous Localization and Map Building*. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, USA 2003.
- [13] Stewart et al.(2001)Stewart, Glegg, Olivieri, Coulson, and Smith. *A Passive Sonar System Based on an Autonomous Underwater Vehicle*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 26, No. 4, October 2001.
- [14] Marks et al.(1994)Marks, Wang, Lee, and Rock. *Automatic visual station keeping of an underwater robot*. Conference Proceedings of the Ocean 1994. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, Brest, France.
- [15] R. Ricardo C. *A class of nonlinear PD-type controller for robot manipulator*. J. Robotic Syst, 1996;13:793-802.

- [16] Nolan S, Toal D (2008) *A low directivity ultrasonic sensor for collision avoidance and station keeping on inspection-class AUVs*. J. Mar Eng Technol A11:1-11.
- [17] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and Sons, Norway, Second edition, 1999.
- [18] Thor I. Fossen. *Marine control systems guidance, navigation, and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics, 2002.
- [19] Thor I. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley, 2011.
- [20] Thor H. Goldstein, C.P. Poole and J.L. Safko. *Classical Mechanics*. Addison Wesley Series in Physics, Addison-Wesley, USA, second edition, 1983.
- [21] Marsden, J.E. *Elementary Classical Analysis*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1974.
- [22] The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. IN: *Technical and Research Bulletin* No. 1-5.
- [23] Yoon SH, Qiao C (2011) *Cooperative search and survey using autonomous underwater vehicles (AUVs)*. IEEE Trans Parallel Distrib Syst 22(3):364-379.
- [24] E. Campos, I. Torres, O. García, J. Torres y R. Lozano. *Embedded System for controlling a mini underwater vehicle in autonomous hover mode*. CESCIT 2012, Germany, April 3-5.
- [25] A.P. Aguiar, J. Almeida, M. Bayat, B. Carneira, R. Cunha *Cooperative Control of Multiple Marine Vehicles* Proceedings of the 8th IFAC International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Guarujá, Brazil, 412-417.
- [26] A. P. Aguiar, A. M. Pascoal, (2007). *Coordinated path-following control for non-linear systems with logic-based communication*. Proceedings of the 46th IEEE

- Conference on Decision and Control, New Orleans, Louisiana, USA, 1473-1479. IEEE.
- [27] J. Almeida, C. Silvestre y A. Pascoal, (2010). *Cooperative control of multiple surface vessels in the presence of ocean currents and parametric model uncertainty*. Control (November 2009), 1549-1565.
- [28] A. R. Teel. *Global stabilization and restricted tracking for multiple integrators with bounded controls*. Systems and Control Letters, 1992.
- [29] L. Jin, X. Xu, S. Negahdaripour, C. Tsukamoto, and J. Yuh. *A Real-Time Vision-Based Stationkeeping System for Underwater Robotics Applications*. Conference Proceedings of the MTS/IEEE Ocean 1996, Prospects for the 21st Century, FL, USA.
- [30] S. van der Zwaan, and J. Santos-Victor. *Real-time Vision-based Station Keeping for Underwater Robots*. Conference Proceedings of the MTS/IEEE Oceans 2001, Conference and Exhibition, Honolulu, HI, USA.
- [31] A. Belbachir, 2011. *A cooperative architecture for target localization using underwater vehicles*. Tesis Doctoral, Universidad de Toulouse, Toulouse.
- [32] A. Belbachir, F. Ingrand, y S. Lacroix, 2010. *Localizing underwater targets using a cooperative AUV architecture*. Proceedings of the 2010 International Conference on Machine and Web Intelligence, ICMWIŠ10, Algiers, Algeria, 153-158. IEEE.
- [33] A. Belbachir, F. Ingrand, y S. Lacroix, 2012. *A cooperative architecture for target localization using multiple AUVs*. Intelligent Service Robotics 5(2), 119-132.
- [34] P. Bhatta, E. Fiorelli, F. Lekien, N. E. Leonard, D. Paley, F. Zhang, R. Bachmayer, R. E. Davis, D. M. Fratantoni, y R. Sepulchre, 2005. *Coordination of an Underwater Glider Fleet for Adaptive Ocean Sampling*. Proceedings of the International Workshop on Underwater Robotics, August, Genoa, Italy. International Advanced Robotics Programmed (IARP).

- [35] L. Briñon Arranz, A. Seuret, A. Sarlette, y C. Canudas de Wit, 2012. *Collaborative Estimation of Gradient Direction by a Formation of AUVs*. Proceedings of the 5th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, Numéro Valuetools, Cachan, France. ACM.
- [36] H. Brown, A. Kim, y R. Eustice, 2008. *Development of a multi-AUVSLAM*. Proceedings of the 2008 at the University of Michigan.
- [37] E. Danson, 2002. *The Economics of Scale : Using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) for Wide-Area Hydrographic Survey and Ocean Data Acquisition* *The Economics of Scale : Using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) for Wide-Area Hydrographic Survey and Ocean Data Acq.* Proceedings of XXII FIG International Congress, Washington, D.C., USA, 1-15.
- [38] D. Edwards, T. Bean, D. Odell, y M. Anderson, 2004. *A leaderfollower for multiple AUV formations*. 2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (IEEE Cat. No.04CH37578), 40-46. IEEE.
- [39] E. Fiorelli, N. E. Leonard, P. Bhatta, D. a. Paley, R. Bachmayer, et D.M. Fratantoni, 2006. *Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay*. IEEE Journal of Oceanic Engineering 31(4), 935-948.
- [40] R. Ghabcheloo, a. P. Aguiar, A. Pascoal, C. Silvestre, I. Kaminer, y J. Hespanha, 2006. *Coordinated path-following control of multiple underactuated autonomous vehicles in the presence of communication failures*. Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA, 4345-4350. IEEE.
- [41] R. Ghabcheloo, A. P. Aguiar, A. Pascoal, C. Silvestre, I. Kaminer, y J. Hespanha, 2009a. *Coordinated Path-Following in the Presence of Communication Losses and Time Delays*. SIAM Journal on Control and Optimization 48(1), 234-265.
- [42] R. Ghabcheloo, I. Kaminer, A. P. Aguiar, y A. Pascoal, 2009b. *A general framework for multiple vehicle time-coordinated path following control*. Proceedings of the 2009

- conference on American Control Conference, ACCS09, Piscataway, NJ, USA, 3071-3076. IEEE Press.
- [43] T. Glotzbach, M. Schneider, y P. Otto, 2008. *Multi System Mission Control for Teams of Unmanned Marine Vehicles - Software Structure for Online Replanning of Mission Plans*. Proceedings of the 7th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT), Liege, Belgium, 185-199. .
- [44] M. Herman y J. S. Albus, 1988. *Overview of the multiple autonomous underwater vehicles (MAUV) project*. Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Volume 7, 618-620. IEEE Comput. Soc.
- [45] I. Kaminer, A. Pascoal, E. Hallberg, y C. Silvestre, 1998. *Trajectory Tracking for Autonomous Vehicles : An Integrated Approach to Guidance and Control*. Journal of guidance, control, and dynamics 21(1), 29-38.
- [46] H.K.Khalil, 1996. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
- [47] W. Khalil y E.Dombre, 1999. *Modélisation, identification et commande des robots*. (Hermes Sci ed.).
- [48] R. Olfati-Saber, 2006. *Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems : Algorithms and Theory*. IEEE Transactions on Automatic Control 51(3), 401-420.
- [49] M. Porfiri, D. Roberson, y D. Stilwell, 2007. *Tracking and formation control of multiple autonomous agents : A two-level consensus approach*. Automatica 43(8), 1318-1328.
- [50] L. Sabattini, N. Chopra, y C. Secchi, 2011. *Distributed control of multi-robot systems with global connectivity maintenance*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, 2321-2325. IEEE. pp 244.

- [51] S. Sariel, T. Balch, y J. Stack, 2006. *Distributed Multi-AUV Coordination in Naval Mine Countermeasure Missions*. Georgia Institute of Technology, College of Computing : Gvu Technical Report, GIT-GVU-06-04.
- [52] A. Sgorbissa y R. Zaccaria, 2010. *3D Path Following with no Bounds on the Path Curvature through Surface Intersection*. Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'10, Taipei, Taiwan, 4029-4035. IEEE.
- [53] C. C. Sotzing, N. Johnson, y D. M. Lane, 2008. *Improving multi-auv coordination with hierarchical blackboard-based plan representation*. Proceedings of the 27th-Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group (PlanSIG), 110-117.
- [54] C. C. Sotzing y D. M. Lane, 2010. *Improving the Coordination Efficiency of Limited-Communication Multi-Autonomous Underwater Vehicle Operations Using a Multiagent Architecture*. Journal of Field Robotics 27(4), 412-429.
- [55] X. Xiang, B. Jouvencel, y O. Parodi, 2010. *Coordinated Formation Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles for Pipeline Inspection*. International Journal of Advanced Robotic Systems 7(1), 1.
- [56] P. Yang, R. Freeman, G. Gordon, K. Lynch, S. Srinivasa, y R. Sukthankar, 2010. *Decentralized estimation and control of graph connectivity formobile sensor networks*. Automatica 46(2), 390-396.
- [57] G.-x. You, Y.-j. Pang, y D.-p. Jiang, 2005. *Market based framework for multiple AUVs cooperation*. Journal of Marine Science and Application 4(2), 7-12.