

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

UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO

**Navegación y control de un mini vehículo
submarino autónomo**

TESIS

Que presenta

M. en C. Iván Torres Tamanaja

Para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS

EN LA ESPECIALIDAD DE

CONTROL AUTOMÁTICO

Directores de Tesis:

Dr. Jorge Antonio Torres Muñoz

Dr. Rogelio Lozano Leal

El riesgo de nadar entre tiburones, no son los tiburones.

El verdadero riesgo es sangrar mientras lo haces.

(I.T.T.)

A la memoria de mi Chanín.

Q.E.P.D.

Dedicatoria

A mis padres:

Saúl Torres Jiménez

Guillermina Tamanaja Ramírez

Por sus palabras de aliento, por la confianza que siempre me han dado, porque son el refugio en mis momentos de duda, porque con nada pago el gran amor y cariño que me profesan sin esperar nada a cambio. Por ser una guía, ejemplo y motor impulsor en mi vida.

A mis hermanas:

Ivonne e Ivette

Qué por todo y sobre todo han mostrado ser las mejores hermanas, porque demuestran su afecto y cariño con las cosas más básicas.

A mis sobrinos:

Iván Santiago

David

Con sus sonrisas me recuerdan que la vida es un juego.

Agradecimientos

A **Dios**, que me da la oportunidad de abrir los ojos a un nuevo día todos los días.

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

Al **Dr. Pedro Castillo Garcia**, que con su estilo muy particular de aconsejar... ¿cómo olvidar su pluma roja?. Con esos detalles hicieron un poco más llevadera esta tesis. Por que en sus palabras descubrí al amigo y hermano en el que puedo confiar plenamente.

Al **Dr. Jorge Antonio Torres Muñoz**, por su interés en el desarrollo de este trabajo de tesis, aportaciones al mismo y sus valiosos consejos, por haber mostrado que más que un asesor es un buen amigo.

Al **Dr. Rogelio Lozano Leal**, por sus consejos y por ser la quien me motivo a continuar con mis estudios de doctorado, así mismo, por haberme puesto donde había oportunidad para mi desarrollo.

Al **Dr. Luc Jaulin** buen ser humano, mejor amigo y gran asesor. Gracias a él he concluido mis estudios de doctorado, por abrir las puertas de Europa, de su laboratorio y principalmente de su casa.

A los doctores **Moisés Bonilla Estrada, Wen Yu Liu, Eduardo Steed Espinoza Quesada y Rafael Castro Linares**, por haber aceptado ser mis sinodales con tan poco tiempo para revisar la presente.

A **Thierry Brizard, Jonathan Grimsdale y Alice Herve** por el soporte brindado a mis estudios de doctorado, por los sabios y valiosos consejos como profesionales en el ámbito laboral.

A **Tamara Brizard** una mujer sin igual, que abrió las puertas de su casa; piedra angular y responsable de que mi aventura europea sea una realidad.

A **Jan Sliwka** mi amigo traidore, con el que compartí mas de una ocasión interesantes debates acerca de la robótica móvil.

A **Fabrice Lebars y Clement Aubry** no recuerdo claramente porqué, pero también les agradezco.

A **Mohamed Saad Ibn Seedik**, por que desde que lo conocí ha sido un leal compañero de escuela y ahora de trabajo.

A mi tío **Enrique** que es un ejemplo de vida y trabajo, con sus sabios consejos es pieza clave de mi vida.

A **Patricia Altamirano Fisch**, por sus sabios consejos y valiosa ayuda. Persona digna de mi admiración y respeto.

A **Carlos Guerrero Rojo** mi amigo el guerrero Rojo, con el que compartí en más de una ocasión una buena comida y que siempre estuvo ahí para ayudarme cuando lo necesite.

A **Sonia A. Alfaro Llamas** por los n-mil permisos que me tramitó para poder hacer uso de mi ordenador portátil en misiones fuera del País.

A **Lucero M. Fernández Campos** por su valiosa ayuda y orientación en todos mis trámites escolares.

A **Mis compañeros de maestría y doctorado**, Rafael Martinez, , Rita Fuentes, Manuel Mera, Aaron Dos Santos, Eduardo Campos, Elba y los caídos en batalla por su compañerismo y amistad.

Índice general

Índice de tablas	x
Índice de figuras	xii
1. Introducción	1
1.1. Estado del Arte	1
1.1.1. Breve Historia en Vehículos Submarinos	1
1.1.2. México en contexto	6
1.2. Vehículos submarinos no tripulados	7
1.2.1. Evolución de vehículos en los 90's	8
1.2.1.1. Centros de investigación en <i>AUVs</i>	10
1.2.2. Avances recientes en investigación submarina	12
1.3. Conceptos básicos para <i>AUVs</i>	13
1.3.1. Flotabilidad	14
1.3.1.1. Estabilidad hidrostática	15
1.3.2. Fuerzas hidrodinámicas	16
1.3.2.1. Vortices	16
1.3.3. Masa agregada	16
1.4. Oceanografía: conceptos básicos	17
1.4.1. Factores que afectan el desempeño de un <i>AUV</i>	17
1.4.1.1. Densidad = ϕ (salinidad, temperatura y profundidad)	18
1.4.2. Óptica submarina y visibilidad	20
1.4.3. Corrientes subacuáticas y mareas	22
1.5. Discusión	24

2. Representación matemática de vehículos submarinos	25
2.1. Clasificación	26
2.2. Convención para vehículos marinos	27
2.3. Cinemática del cuerpo rígido	28
2.3.1. Matriz de rotación	30
2.3.2. Matriz de transformación	32
2.4. Representación matemática	34
2.4.1. Matriz de inercia	34
2.4.2. Matriz de coriolis	35
2.4.3. Matriz de amortiguamiento hidrodinámico	37
2.4.4. Fuerzas y momentos de restitución	38
2.5. Ecuaciones de movimiento en \mathcal{I}	40
2.6. Descripción del vehículo 4 – T^2	40
2.6.1. Movimiento traslacional	43
2.6.1.1. Traslación en x	44
2.6.1.2. Traslación en y	44
2.6.1.3. Traslación en z	45
2.6.2. Movimiento rotacional	45
2.6.2.1. <i>Roll</i> (ϕ)	45
2.6.2.2. <i>Pitch</i> (θ)	45
2.6.2.3. <i>Yaw</i> (ψ)	46
2.6.3. Fuerzas y momentos de los actuadores	47
2.6.3.1. Fuerzas de traslación	47
2.6.3.1.1. Análisis de fuerzas en x	49
2.6.3.1.2. Análisis de fuerzas en y	49
2.6.3.1.3. Análisis de fuerzas en z	49
2.6.3.2. Momentos ϕ, θ y ψ	49
2.6.3.2.1. Momentos alrededor de x_B, τ_ϕ	51
2.6.3.2.2. Momentos alrededor de y_B, τ_θ	51
2.6.3.2.3. Momentos alrededor de z, τ_ψ	52
2.7. Descripción del vehículo OME y CHAAK	53

2.7.1.	Movimiento traslacional	54
2.7.1.1.	Traslación en x	54
2.7.1.2.	Traslación en y	55
2.7.1.3.	Traslación en z	55
2.7.2.	Movimiento rotacional	56
2.7.2.1.	<i>Yaw</i> (ψ)	57
2.8.	Modelos utilizados para control	57
2.8.1.	Modelo para análisis de intervalos	58
3.	Análisis de Intervalos	60
3.1.	Preliminares	60
3.1.1.	Intervalos	61
3.1.1.1.	Operadores Binarios	62
3.1.2.	Función de inclusión	63
3.2.	Contractores	63
3.3.	Propagación de restricciones	65
3.3.1.	Conjunto de restricciones para satisfacción del problema (CRSP)	65
3.3.2.	Aplicación del CSPR a un <i>AUV</i>	68
3.4.	Resultados en simulación y experimentos	69
3.4.1.	Validación en simulación	70
3.4.2.	Validación en tiempo real	70
3.4.2.1.	Resultados con el vehículo <i>Sardine</i>	71
3.4.2.2.	Resultados con el vehículo <i>CHAAK</i>	72
4.	Navegación	79
4.1.	Controlador cinético y cinemático	82
4.1.1.	Análisis de estabilidad	89
4.2.	Resultados en simulación	90
4.3.	Discusión	91
5.	Prototipos	94
5.1.	Electrónica embebida	94

5.1.1.	Procesamiento embebido	94
5.1.2.	Sensores	96
5.1.2.1.	Profundidad	96
5.1.2.2.	Orientación espacial y magnética	96
5.1.2.3.	Sonar	97
5.1.2.4.	Velocidad	98
5.1.2.5.	Biológicos	99
5.1.2.6.	Otros	101
5.1.3.	Actuadores	101
5.1.3.1.	Propulsores con propela	102
5.1.3.2.	Superficies de control	102
5.1.3.3.	Bio-inspirados	103
5.1.4.	Comunicaciones	104
5.1.4.1.	Comunicacion interna	104
5.1.4.2.	Comunicación externa	105
5.1.4.2.1.	Modem acústico:	109
5.2.	Fuselaje	109
5.2.1.	Aspectos Mecánicos	109
5.2.2.	Aspectos Hidrodinámicos	110
5.3.	Energía para propulsión	111
5.3.1.	Baterías	111
5.3.2.	Energías Limpias	112
5.3.2.1.	Celda de Hidrógeno	112
5.3.2.2.	Celda Solar	113
5.3.2.3.	Energía térmica y mareomotriz	114
5.4.	Sistemas Operativos	114
5.4.1.	ROS - <i>Robot Operating System</i>	115
5.4.2.	MOOS - <i>Mission Oriented Operating Suite</i>	116
5.4.3.	Otros	116
5.5.	Prototipos desarrollados	117
5.5.1.	Vehiculo 4 – T^2	117

5.5.2. OME-AUV	118
5.5.3. CHAAK-AUV	118
5.6. Otros prototipos	120
5.6.1. SAUC'ISSE y Sardine	120
5.6.2. SAFRAN-Alpha	120
6. Conclusiones y trabajo futuro	122
Bibliografía	124

Resumen

En la actualidad los vehículos autónomos son objeto de investigación científica en todo el mundo, para su estudio se dividen en 3 grandes áreas: terrestre, aérea y acuática. Su principal desarrollo está en las áreas civiles y militares, entre sus principales aplicaciones son: la búsqueda y rescate en zonas de alto riesgo, inspección y mantenimiento en instalaciones marinas, como sondas meteorológicas, geofísica, hidrografía, cartografía, entre otras.

Un caso particular e interesante en cuanto a vehículos autónomos se refiere son los submarinos, los cuales durante la última década han sido objeto de investigación seria e intensiva por parte de la comunidad científica. Esta investigación es debida a que desde un punto de vista teórico y de aplicación, los submarinos autónomos ofrecen un problema que involucra muchos desafíos tecnológicos y de control.

Este trabajo consiste en el estudio, desarrollo e implementación de un sistema mecatrónico que proporciona autonomía a un vehículo submarino. También, se proponen leyes de navegación y control que aseguren la localización y navegación de esta clase de vehículos, inclusive si navegan en presencia de perturbaciones ambientales tales como las corrientes submarinas.

Para controlar la orientación y posición de este vehículo se hace uso de una ley de control PD saturada. Esta ley de control al combinarla con otras técnicas para posicionamiento y navegación permiten la navegación autónoma del vehículo. En cuestiones de navegación se proponen un algoritmo de localización basado en el análisis de intervalos. Esta técnica ofrece la ventaja de proporcionar solución numérica finita a ecuaciones dinámicas lineales o no lineales según sea el caso, además de proporcionar robustez ante errores de medición en los sensores.

De manera similar se estudia una ley de control basada en *backstepping*, con esta técnica se logra la navegación del vehículo en presencia de perturbaciones ambientales constantes como lo son en ocasiones las corrientes submarinas. Los resultados son obtenidos a partir del modelado dinámico de traslación y orientación del vehículo submarino, el cual realiza movimientos a baja velocidad y es capaz de orientarse en forma automática.

Al final de los capítulos de intervalos y *backstepping* se presentan resultados tanto de simulación, como experimentales. En el último capítulo se da una breve explicación de la concepción y elaboración de este tipo de vehículos y los problemas que implican su desarrollo.

Abstract

Recently autonomous vehicles are subject of worldwide scientific investigation, for their study these are divided into 3 main areas: land, air and water. The main development is in the civilian and military areas; its main applications are search and rescue in hazardous areas, inspection and maintenance of offshore platforms, as weather balloons, geophysics, hydrography, cartography, among others.

An interesting case in terms of autonomous vehicles is submarines, which during the last decade have been the subject of serious and intensive investigation by the research community. This research is because from a theoretical point of view and for applications, the autonomous underwater provide a problem involving many technological challenges and control, as well.

The aim of this study is the development and implementation of a mechatronics system that provides autonomy to a submarine vehicle. Also, controllers are proposed to control and ensure the navigation and localization of such kind of vehicles, even in the presence of environmental perturbations such as underwater currents.

To control the orientation and position of the vehicle, a saturated PD control law is used. This control law combined with other techniques for positioning and navigation allows autonomous navigation to the vehicle. For navigation purpose, an algorithm for localization based on interval analysis is proposed. This technique offers the finite numerical solution for dynamic equations linear or nonlinear depending on the case. Moreover, it provides robustness against errors in the measurements due to the noise sensor.

Likewise, a control law based on backstepping is studied, this technique allows the navigation of the vehicle in the presence of constant environmental disturbances such as underwater currents. The results are obtained from the dynamic modeling and translational orientation of an underwater vehicle, which performs low-speed movement and is able to orient automatically.

At the end of the chapters of intervals and backstepping, both simulation results, and experimental are presented. Finally, a chapter explaining the design and development of such kind of vehicles and the problems involved in the development are shown

Objetivo

- ◇ Estudiar las propiedades y leyes físicas de los submarinos con la finalidad de otorgarles/proporcionales autonomía.
- ◇ Estudiar los efectos hidrodinámicos y su influencia en la navegación de los *AUVs*¹.
- ◇ Desarrollar algoritmos de control robustos ante perturbaciones externas, como son las corrientes submarinas, que permitan la navegación autónoma del vehículo.
- ◇ Estimación de la posición del vehículo utilizando observadores no convencionales.
- ◇ Concebir algoritmos de detección de fallas y reconfiguración del controlador para garantizar la estabilidad del vehículo.

¹*AUV* se refiere a Autonomous Underwater Vehicles

Notación General

Notación para Vehículos Marinos

AUV	Vehículo Submarino Autónomo (<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>)
UVR	Vehículo Robot Submarino (<i>Underwater Vehicle Robotics</i>)
ROV	Vehículo Remotamente Operado (<i>Remotely Operated Vehicles</i>)
UVMS	Vehículo Submarino con Sistema Manipulador (<i>Underwater Vehicle-Manipulator System</i>)
INS	Sistema de navegación inercial (<i>Inertial Navigation System</i>)
SNAME	Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (<i>Society of Naval Architects and Marine Engineers</i>)
IMU	Unidad de Medición Inercial (<i>Inertial Measurement Unit</i>)
DOF/GDL	Grados De Libertad (<i>Degree Of Freedom</i>)
DVL	sensor de registro de velocidad tipo Doppler (<i>Doppler Log Velocity</i>)
W	Peso del cuerpo (<i>Weight</i>)
B	Fuerza de Flotabilidad (<i>Buoyancy</i>)
C_M	Centro Masa
C_B	Centro de Flotabilidad
M_{RB}	Matriz de masa e inercia del cuerpo rígido
M_A	Matriz de masa agregada
C_{RB}	Matriz de coriolis debida a la masa e inercia del vehículo
C_A	Matriz de coriolis debida a la energía cinética del fluido
D_S	Fricción entre el fuselaje y el medio
D_W	Fricción debida a corrientes marinas
D_M	Amortiguamiento debido a los vórtices

D_P	Amortiguamiento potencial
\mathcal{B}	Marco fijo en el cuerpo
\mathcal{I}	Marco inercial
$\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$	Orientación del vehículo descrito por los ángulos de Euler
FOG	Giroscopio de Fibra Óptica (<i>Fiber Optic Gyroscope</i>)
RLG	Giroscopio de anillo laser (<i>Ring Laser Gyroscope</i>)
MEMS	Sistema micro-electromecánico (<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>)

Análisis de Intervalos

\emptyset	Conjunto vacío
\mathbb{S}	conjunto
\mathbb{N}	Conjunto de todos los enteros positivos
\mathbb{Z}	Conjunto de todos los enteros
\mathbb{R}	Conjunto de todos número reales
\mathbb{IR}	Conjunto de todos los intervalos de número reales
$[x] = [\underline{x}, \bar{x}]$	intervalo escalar
$[\mathbf{x}] = [\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}]$	intervalo vectorial
$lb([x])$	valor inferior de $[x]$
$ub([x])$	valor superior de $[x]$
$w([x])$	ancho de $[x]$
$mid([x])$	centro de $[x]$

Otros

ODEs	Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (<i>Ordinaries Differentials Equations</i>)
------	--

Índice de tablas

1.1. Desarrollo de AUV's en los 90's	8
1.2. Centros de investigación de <i>AUVs</i>	10
1.3. Componentes del agua de mar	19
1.4. Escala <i>Beaufort</i>	23
2.1. Notación utilizada para vehículos marinos de acuerdo a la SNAME	28
2.2. Relación entre vectores de posición y orientación	31
3.1. Algoritmo de localización	73
5.1. Centrales inerciales y sistemas de navegación mas comerciales	98
5.2. Comparación de características principales en propulsores de propela	102
5.3. Bandas de frecuencia para posicionamiento submarino	109
5.4. Características mecánicas de los materiales usados en fuselajes de <i>AUVs</i>	110

Índice de figuras

1.1. Leonardo Da Vinci y su <i>Codex Atlanticus</i>	2
1.2. William Bourne y Cornelius Drebbel	3
1.3. David Bushnell y su creación, <i>The Turtle</i>	4
1.4. Primeros submarinos de guerra	5
1.5. Deepsea Challenger en pruebas	12
1.6. Deepsea Challenger en operación	13
1.7. Imagen comparativa de la fosa de las Marianas	14
1.8. Efectos de la fuerza de flotabilidad y el peso en un cuerpo sumergido en agua	15
1.9. Posiciones estable e inestable de un cuerpo sumergido en un fluido	15
1.10. Comportamiento de los océanos	18
1.11. Fenómenos de termoclina y haloclina	20
1.12. Relación de profundidad contra presión hidrostática	21
1.13. Espectro de Luz visible	22
2.1. Marcos de referencia	30
2.2. Marcos de referencia locales	31
2.3. Relación peso-flotabilidad	39
2.4. Simplificación del vehículo para la obtención de momentos de inercia	42
2.5. Combinación para traslación rotación	43
2.6. Traslación a lo largo del eje x	44
2.7. Traslación a lo largo del eje y	44
2.8. Traslación a lo largo del eje z	45
2.9. Rotación alrededor del eje x (<i>Roll</i>)	46

2.10. Rotación alrededor del eje y (<i>Pitch</i>)	46
2.11. Rotación alrededor del eje z (<i>Yaw</i>)	47
2.12. Traslación sobre el eje y	49
2.13. Traslación sobre el eje z	50
2.14. Par generado alrededor de x , τ_ϕ	52
2.15. Par generado alrededor de y , τ_θ	52
2.16. Par generado alrededor de z , τ_ψ	53
2.17. Imagen CAD de OME y CHAAK	54
2.18. Traslación a lo largo del eje x	55
2.19. Traslación a lo largo del eje y	56
2.20. Traslación a lo largo del eje z	56
2.21. Rotación alrededor del eje z (<i>Yaw</i>)	57
3.1. Representación gráfica del ejemplo 1.2.	68
3.2. Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [X].	74
3.3. Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [Y].	74
3.4. Posición estimada (\hat{x}, \hat{y}) en simulación en la alberca.	75
3.5. Posición estimada (\hat{x}, \hat{y}) dentro de la alberca.	75
3.6. Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [X].	76
3.7. Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [Y].	76
3.8. Posición estimada (\hat{x}, \hat{y}) dentro de la alberca para el vehículo CHAAK.	77
3.9. Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [X].	77
3.10. Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [Y].	78
4.1. Navegación en presencia de corriente submarina	79
4.2. Problema de control dividido en cinemático y dinámico	82
4.3. Trayectoria del vehículo en el plano \mathbf{xy}	91
4.4. Marcos de navegación en presencia de corriente submarina	92
4.5. Perturbación simulada <i>vs</i> perturbación estimada	92
4.6. Error de seguimiento sobre el eje y	93
4.7. Entrada de control	93

5.1. Arquitectura general de los <i>AUVs</i>	95
5.2. Tendencias en procesadores	95
5.3. Sistemas de posicionamiento para vehículos submarinos	100
5.4. Abierta	102
5.5. Túnel	102
5.6. Tipos de propulsor con propela	102
5.7. <i>Glider</i>	103
5.8. <i>Naro</i>	104
5.9. <i>Galatea</i>	104
5.10. Ejemplo de vehículos bio-inspirados	104
5.11. Sistemas de posicionamiento para vehículos submarinos	108
5.12. Baterías	111
5.13. funcionamiento de un celda de hidrógeno	113
5.14. Vehículo Urashima propiedad de JAMSTEC	113
5.15. Vehículo <i>SAUV</i> , cooperación entre <i>AUSI</i> y <i>IMTP</i>	114
5.16. Robots que se pueden controlar con <i>ROS</i>	115
5.17. Vehículo 4 – T^2	118
5.18. Vehículo OME-AUV	119
5.19. Vehículo Chaak	119
5.20. <i>AUVs</i> , SAUC'ISSE y Sardine	120
5.21. Vehículo Safran-Alpha	121

Introducción

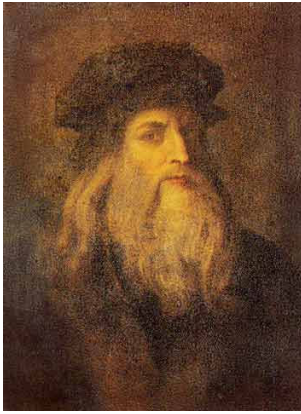
1.1. Estado del Arte

Desde tiempo inmemoriales el ser humano se las ha ingeniado para obtener los medios que le permitan sobrevivir en los ambientes más amigables hasta en los más hostiles de este planeta. Para ello se ha valido de la invención de herramientas y utensilios que le faciliten su desarrollo y adaptación al medio. Es así, como construyó viviendas que lo protegieran de los cambios inclementes del medio ambiente. Poco después con las distancias entre poblaciones, inventó los medios de transporte y domesticó animales para tirar de carretas que le permitieran llevar mercancías de un lugar a otro y poder iniciar lo que denomino, comercio.

En principio todos estos descubrimientos y desarrollos los hizo para cubrir sus necesidades básicas de alimentación. Posteriormente, su ingenio le sirvió para iniciar el desarrollo de máquinas que lo llevaran a donde nunca antes había podido llegar. De esta manera, inventó el barco, que le sirvió para surcar los mares y alcanzar tierras inexploradas en busca de nuevas y mejores tierras, por consecuencia mejores rutas de comercio. Posteriormente, inventaría el automóvil, aeroplano, las naves espaciales, etc. La historia del ser humano ha estado ligada siempre a la investigación y desarrollo en busca de una mejor calidad de vida.

1.1.1. Breve Historia en Vehículos Submarinos

A lo largo de la historia, el hombre ha construido vehículos para poder explorar la tierra, los cielos y los mares. Por ejemplo, en cuestiones marítimas primero desarrolló los



(a) Leonardo Da Vinci

(b) *Codex Atlanticus*Figura 1.1: Leonardo Da Vinci y su *Codex Atlanticus*

navíos para poder navegar sobre el mar; posteriormente, los submarinos para explorar sus profundidades. Una de las grandes mentes de la antigüedad es sin duda la del filósofo Aristóteles que según cuenta la leyenda fue, el primero en crear un submarino la *Skaphe Andros (Boat-man)*. Este vehículo le permitió a Alejandro el Grande (*Alexander III de Macedonia* entre 356-323 A.C.) permanecer bajo el agua medio día durante la guerra de Tiro en el año 325 A.C. Por otra parte, probablemente esta leyenda sea falsa, ya que el famoso principio de Arquímedes se conoció hasta el año 250 A.C. aproximadamente.

Tiempo después apareció Leonardo da Vinci, con las primeras ideas documentadas acerca del estudio de vehículos en su obra titulada *Codex Atlanticus* escrito entre 1452 y 1518. En esta obra además del primer submarino también se incluyen algunos dispositivos para bucear, la primer bicicleta, el primer auto, el primer helicóptero, etc. Se dice además que fue él quien creó una primitiva embarcación sumergible que como estructura base tenía madera recubierta de pieles de cabra [7].

Con el tiempo la historia registró una contribución británica con conceptos de submarinos modernos. William Bourne era un carpintero y armero, el cual a finales de 1500 incluyó el concepto de construcción de doble casco, así como lastre y sistemas de acabado. El primer concepto para un submarino militar fue propuesto por el físico holandés, Cornelius Van Drebbel. Además de la construcción y la demostración de un sumergible primitivo propuso un diseño creado específicamente para destruir otras naves, para ello tomó un barco de pesca, le instaló un techo de madera y lo recubrió con cuero engrasado.

El vehículo era movido con la fuerza de doce remeros que respiraban gracias a un tubo (esnórquel), este suceso se llevó acabo en el río Támesis en 1620 con una profundidad aproximada de 12 y 15 pies (4 - 5 metros), otra característica es que esta invención era capaz de transportar 16 pasajeros. Este submarino fue presentado al rey de Inglaterra Jaime I. Durante la demostración el submarino se trasladó desde desde Westminster a Greenwich ida y vuelta. El propio rey participó en la travesía junto con Drebbel, convirtiéndose en el primer monarca en viajar en submarino. La finalidad era destruir naves de los Estados Unidos por lo que se le asocia la creación del primer diseño funcional de submarino militar.



(a) William Bourne

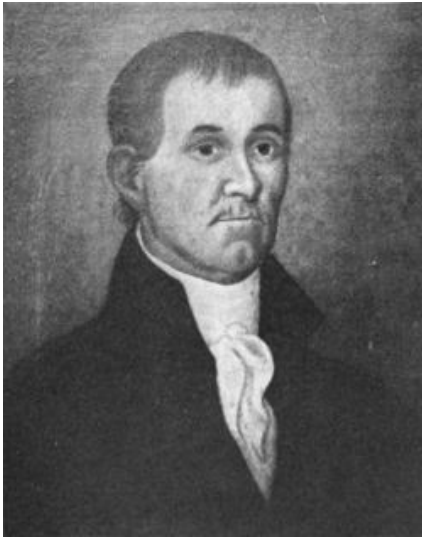


(b) Cornelius Drebbel

Figura 1.2: William Bourne y Cornelius Drebbel

En 1776, un estudiante de la Universidad de Yale llamado David Bushnell, ver Figura 1.3a, diseñó el apropiadamente llamado *Turtle*, ver Figura 1.3b. Este vehículo era un sumergible de forma ovalada como un huevo, un navío pequeño sumergible de 2.30 m de largo y 1.80 m de ancho. Este vehículo compuesto por dos piezas idénticas de madera de roble de forma cóncava, semejantes a dos caparazones de tortuga (de allí su nombre), unidos y reforzados por barras de hierro. La estabilidad estaba garantizada por un lastre de plomo. Un tanque de lastre que se llenaba abriendo una válvula y que se podía vaciar con dos bombas manuales de latón permitían controlar la flotabilidad. El vehículo tenía la capacidad de sorprender a un barco a través de sumergirse bajo de su víctima, este prototipo llevaba una especie de taladro que era operado desde el interior, con el instalaba una bomba de tiempo a prueba de agua en la parte inferior del casco, esto le permitía escapar antes de que la bomba detonara. El submarino fue impulsado por una manivela

tornillo, y tenía espacio para un tripulante con exceso de trabajo.



(a) David Bushnell



(b) Submarino *Turtle*

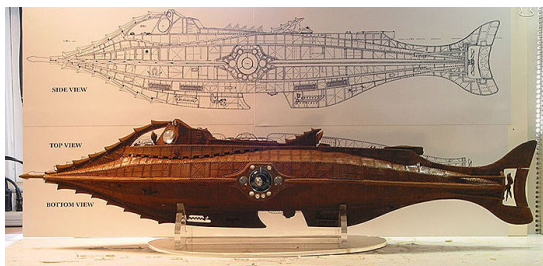
Figura 1.3: David Bushnell y su creación, *The Turtle*

En la noche del 06 de septiembre 1776, el sargento Esdras Lee, del ejército continental se le asignó la misión de utilizar la tortuga para atacar al *HMS Eagle* y liberar del bloqueo británico la ciudad de Nueva York. El sargento Lee embarcó y se acercó al *HMS Eagle* e hizo sumergir a la Tortuga con el fin de colocarse debajo del buque. Intentó durante largos minutos perforar el casco para colocar la carga explosiva. El oxígeno comenzó a faltar (aproximadamente 30 minutos de reserva), y se vio obligado a alejarse y salir a la superficie para renovar el aire. Intentó nuevamente sin éxito colocar la carga, obstruido por el blindaje de cobre que poseen en el casco algunos buques británicos. Agotado, Lee debió hacer frente a varios peligros mientras iba amaneciendo. Lee, debió luchar contra la marea que amenazaba con arrastrarlo. Para aligerarse decidió deshacerse de la carga explosiva. Ésta, al quedar a la deriva, no tardó en estallar del lado de las naves británicas, causando gran pánico. La flota británica levó el ancla para marchar hacia aguas más seguras. El sargento Lee y la Tortuga no consiguieron destruir la nave británica, pero causaron la ruptura del bloqueo a Nueva York, esta se conoce como la primer batalla naval que involucró submarinos.

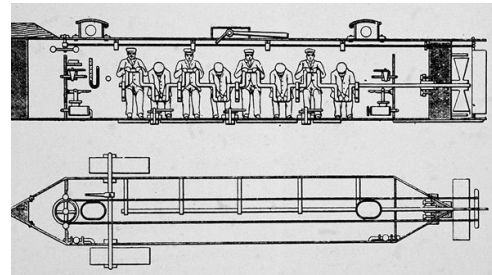
Un avance sustantivo fue el *Nautilus*, ver Figura 1.4a, diseñado por el Estadounidense Robert Fulton que tiempo después pasaría a diseñar el primer barco de vapor. El *Nautilus*

era una clara mejora sobre el vehículo *Turtle*. El diseño fue un excepcional éxito destruyendo varios buques durante los ejercicios de prueba. Los Franceses se impresionaron lo suficiente tal que le ofrecieron un contrato a Fulton.

En 1863 un barco sumergible fue diseñado por el condecorado oficial Horace Hunley de la marina Estadounidense. Su barco, el CSS Hunley H.L., ver Figura 1.4b, era impulsado por ocho hombres que hacían girar una manivela que le daba la propulsión. Como armamento portaba un mina explosiva o torpedo, el cual era asegurado a un palo largo que sobresalía al frente del Hunley. La idea era que el Hunley debía embestir a su víctima torpedearlo por el costado por donde sería detonado. Por desgracia, el Hunley era difícil de manejar y varios integrantes del equipo junto con su diseñador murieron durante las pruebas de inmersión [22].



(a) Submarino Nautilus



(b) Submarino CSS Hunley

Figura 1.4: Primeros submarinos de guerra

En noviembre de 1879, el reverendo George W. Garret diseñó lo que fue considerado por algunos como el primer submarino propulsado, el *Resurgam*, fue concebido como un arma para penetrar en la cadena de malla colocado alrededor de los cascos de los buques para defenderse de los ataques de los buques torpederos. Fue construido en la *Brittannia Engine Works and Foundry*, propiedad de J. B. Cochran en Birkenhead, Inglaterra. Este submarino fue propulsado en principio en forma manual, en un segunda versión fue impulsado por una máquina de vapor *Lamm*, la cual podía proveer de propulsión por aproximadamente 10 horas debido a que almacenaba energía en un tanque con aislamiento.

1.1.2. México en contexto

México es un país con una extensión territorial de tamaño considerable, la cual cubre una superficie total de $1,964,375 \text{ km}^2$, esta extensión territorial lo posiciona en el lugar número 14 del mundo. El país tiene 11,122 km de litorales continentales que lo llevan a ocupar el segundo lugar en el continente americano, sus costas se reparten en: al oeste, el océano Pacífico y el golfo de California; al este, el golfo de México y el mar Caribe. Sobre el océano Atlántico el país tiene 3,117.7 kilómetros lineales de costas y 8,475.1 km. sobre el Océano Pacífico. Debido a su posición geográfica la actividad marítima es de gran relevancia en la economía del país. Dentro de las principales actividades se encuentran: la petrolera (eje de la economía), turismo y la pesca. Las mencionadas actividades requieren de un estudio de los mares, no solo para su explotación, sino también para su conservación. Estos estudios se han realizado por años haciendo uso de recursos de baja tecnología o con actividades que en muchas ocasiones resultan peligrosas no solo para el ser humano sino también en daño a los ecosistemas.

En años recientes no solo en México sino a nivel mundial se ha incrementado la actividad en el desarrollo de herramientas que ayuden no solo en la explotación, sino también en favor de la preservación de los mares. Es así, como los vehículos submarinos no tripulados o remotamente operados han aparecido en escena para ayudar a resolver tareas que antes implicaban alto riesgo o simplemente eran imposible de lograr. En la actualidad dentro de las carencias de ciencia y tecnología con las que cuenta el país, posiblemente una de las áreas que recibe menor atención es la concerniente al estudio de los mares.

Los motivos son diversos: los consumidores finales no están interesados en invertir en investigación, los investigadores que pudieran desarrollar la tecnología no desean invertir su tiempo en las cuestiones experimentales por que demandan mucho tiempo además de que los recursos humanos y económicos con los que cuentan son pocos.

Ante los retos que propone esta área de investigación, desde 2009 en la *UMI-LAFMIA* se comenzó el estudio y diseño de vehículos submarinos, a fin de capacitar y preparar personas especialistas en esta área. Es así, que a la fecha se diseña y prueba la 5ta generación de prototipos *AUVs* y *ROVs* desarrollados en este laboratorio. Cabe mencionar

que cada versión tiene mejoras con respecto a los prototipos anteriores; estas van desde la optimización hidrodinámica de los fuselajes, concepción de nuevos y mas eficientes algoritmos de localización y control, rapidez en el calculo embebido, etc.

1.2. Vehículos submarinos no tripulados

En nuestros días las profundidades del mar continúan siendo un misterio, ya que se han explorado en forma parcial. Desde mediados de los 60's y con la ayuda de la ciencia y tecnología aparecieron los **vehículos submarinos no tripulados** (*Unmanned Underwater Vehicles UUVs*), que han permitido explorar lugares que antes no se habían podido explorar por el riesgo que representaban para el ser humano. Estos vehículos los podemos dividir en dos grupos: los **vehículos remotamente operados** (*Remote Operated Vehicles, ROVs*) y los **vehículos submarinos autónomos** (*Autonomous Underwater Vehicles, AUVs*). Estos vehículos se han convertido en muy buenas herramientas de exploración submarinas y han contribuido en la realización de tareas militares, académicas y civiles. Así por ejemplo, los **vehículos submarinos con sistema manipulador** (*Underwater Vehicle-Manipulator System, UVMS*) han reemplazado a buzos en tareas de exploración en áreas de riesgo o contaminadas, también inspeccionando y reparando plataformas marinas, por mencionar sólo algunas de las funciones que realizan. A continuación se dan más ejemplos de donde se aplican estos vehículos.

Civil

- ◇ Gas y petróleo
 - Mantenimiento a plataformas
 - Inspección y mantenimiento de oleoductos
 - Adquisición de señales geofísicas
- ◇ Mantenimiento e inspección de presas
- ◇ Inspección rápida de barcos mercantes

Académico y de investigación

- ◇ Estudio del cambio climático en mares
- ◇ Estudio de las mareas
- ◇ Estudio del comportamiento del plancton
- ◇ Estudio del comportamiento de peces
- ◇ Conservación de especies
- ◇ Búsqueda de pecios
- ◇ Arqueología submarina

Militar

- ◇ Desactivación de minas submarinas de la segunda guerra mundial
- ◇ Acciones anti-terrorismo
- ◇ Inspección rápida de barcos y submarinos
- ◇ Vigilancia de límites y lucha contra el narcotráfico
- ◇ Búsqueda y rescate

1.2.1. Evolución de vehículos en los 90's

La historia registra que el primer AUV fue desarrollado en el laboratorio de Física Aplicada de la Universidad de Washington en 1957. El vehículo llamado *SPURV* fue desarrollado para fines especiales de investigación submarina y se utilizó para estudiar la difusión y transmisión acústica. Desde esa fecha, el desarrollo de estos vehículos experimentó un interés y crecimiento exponencial. Por ejemplo, en la Tabla 1.1 se muestra un resumen de la evolución de estos vehículos en los años 90's, ver [107].

Tabla 1.1: Desarrollo de AUV's en los 90's

Año	Vehículo	Propósito	Prof.(m)	Constructor
1990	UROV-2000	Mapeo del suelo marino	2000	JAMSTEC, Yokosuka, Japón
1990	Sin nombre	Vehículo de pruebas para control	10	JAMSTEC, Yokosuka, Japón

Continúa en la siguiente página

Tabla 1.1 – continuación de la página previa

Año	Vehículo	Propósito	Prof.(m)	Constructor
1990	Musaku	Vehículo de pruebas para control	10	JAMSTEC, Yokosuka, Japón
1990	UUV (II)	Vehículo de pruebas	NA	Draper Laboratory, Cambridge, MA
1991	AROV	Búsqueda y caracterización del suelo	NA	SUTEC, Linkoping Sweden
1992	AE1000	Inspección de Cables	1000	KDD, Japón
1992	Twin Burger	Vehículo de pruebas	50	IIS, Universidad de Tokio, Japón
1992	ALBAC	Prueba para columna de agua	300	IIS, Universidad de Tokio, Japón
1992	MAV	Detección de minas	NA	DARPA, Washington, DC
1992	Doggie	Mapeo del suelo marino	6000	Yard Ltd, Glasgow, Scotland
1992	Dolphin	Monitoreo de aguas	6000	Yard Ltd, Glasgow, Scotland
1992	ABE	Mapeo del suelo marino	6000	WHOI, Woods Hole, MA
1992	Phoenix	Vehículo de pruebas	10	Naval Postgraduate School, Monterrey, CA
1992	ODIN	Vehículo de pruebas	30	ASL, University of Hawaii, Honolulu, HI
1993	Ocean Voyager II	Misiones científicas	6000	Florida Atlantic University, Boca Raton, FL
1993	Odyssey II	Misiones científicas	6000	MIT Sea Grant, Cambridge, MA
1993	ARUS	Mapeo del suelo marino	NA	EUREKA (European Consortium)
1993	ODAS	Reconocimiento	900	Marconi Underwater Systems, UK
1993	Hugin	Reconocimiento	600	Norwegian Defense Establishment, Norway
1993	Marius	Reconocimiento	600	IST, Lisbon, Portugal (w/France and Denmark)
1994	Large-D UUV	Militar/Vehículo de pruebas	300	Naval Undersea Warfare Center, Newport, RI
1994	OTTER	Vehículo de pruebas	1000	MBARI, CA
1994	Explorer	Inspección de oleoductos	1000	ISE, Canada
1995	ODIN II	Experimentos en aguas	30	ASL, University of Hawaii, Honolulu, HI
1995	RI	Mapeo del suelo marino	400	Mitsui Engineering, IIS, U. of Tokyo, Japan
1995	Autosub-1	Monitoreo ambiental	750	Southampton Oceanography, Centre, UK
1996	Theseus	Reconocimiento bajo hielo del ártico	1000	ISE, Canada
1997	REMUS	Reconocimiento	150	Woods Hole Oceanographic Institution, MA
1997	VORAM	Vehículo de pruebas	200	Korea Research Inst. of Ships Ocean Engr., Korea

Continúa en la siguiente página

Tabla 1.1 – continuación de la página previa

Año	Vehículo	Propósito	Prof.(m)	Constructor
1998	Solar AUV	Vehículo de pruebas	N/A	Autonomous Undersea Systems Institute, NH
1998	AUV-HMI	Vehículo de pruebas	N/A	National Taiwan University, Taiwan
1998	AMPS	Militar	200	Pacific Missile Range Facility, Kekaha, HI
1998	SIRENE	Transporte submarino	4000	DESIBEL, European Project led by IRFEMER, France
1999	SAUVIM	Intervención científica/militar	6000	ASL, University of Hawaii, Honolulu, HI

1.2.1.1. Centros de investigación en AUVs

Actualmente existen más de 150 prototipos de *UUVs* y *ROVs* en laboratorios y compañías de todo el mundo, algunos dedicados a la investigación, otros a la comercialización y renta de estos equipos. La Tabla 1.2 lista algunas universidades y centros de investigación junto con sus prototipos más importantes en el área, claro esta que no son las únicas, si el lector se encuentra interesado en más información el laboratorio de ingeniería en sistemas marinos (*Marine Systems Engineering Laboratory*, MSEL, por sus siglas en inglés [63]) en conjunto con el sitio web del Dr. Uwe Zimmer, ver [109], concentran una gran cantidad de información relativa a *AUVs*.

Tabla 1.2: Centros de investigación de *AUVs*

Laboratorio	Vehículo(s)
	Odyssey II, Odyssey I
MIT ^[86]	Reef Explorer
	Reef Explorer II
	NEREUS
	ROV Jason/Medea
	(HROV) Nereus
Woods Hole Oceanographic Institution ^[46]	AUV Sentry

Continúa en la siguiente página

Tabla 1.2 – continuación de la página previa

Laboratorio	Vehículo(s)
	AUV Jaguar
	AUV Puma
	AUV SeaBed
	Bluefin-9
	Bluefin-12S
	Bluefin-12D
Bluefin Robotics ^[93]	Bluefin-21
	HAUV
	Spray Glider
	Hawkes ROVs
Autonomous Systems Laboratory - University of Hawaii ^{[82],[81],[78]}	SAUVIM
	ODIN
Australian National University (ANU) ^{[83],[80]}	Serafina
	Kambara
	PTEROA150
	ALBAC
	TWIN-BURGER
	TWIN-BURGER2
Underwater Robotics & Application (URA) - University of Tokio ^[8]	Manta-Ceresia
	R-one
	Tri-dog 1
	Tantan
	r2D4
	UNA-SAND
	C-Surveyor II
C & C Technologies ^[16]	C-Surveyor III
	C-Surveyor IV

Continúa en la siguiente página

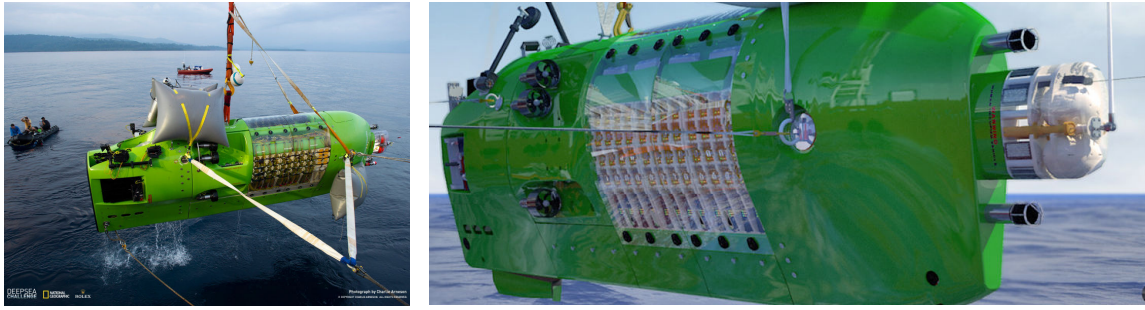


Figura 1.5: Deepsea Challenger en pruebas

Tabla 1.2 – continuación de la página previa

Laboratorio	Vehículo(s)
	C-Surveyor V
	PTEROA150
	ALBAC
Boston Engineering[33]	TWIN-BURGER
	TWIN-BURGER2
	Manta-Ceresia
	R-one

1.2.2. Avances recientes en investigación submarina

El 26 de Marzo del 2012 James Cameron, de nacionalidad canadiense guionista, director y productor de cine (famoso por películas como *The Terminator*, *Titanic* y *Avatar*), abordo del *DeepSea Challenger* (ver figuras 1.5 y 1.6) realizó una expedición a lo más profundo de las fosa de las Marianas (*Mariana Trench*), lugar de la fosa oceánica más profunda conocida y el lugar más profundo de la corteza terrestre.

La Figura 1.7 ilustra cuan profunda es esta poza, ya que es comparada con la altura a la que vuelan los aviones comerciales y la montaña más elevada sobre la faz de la tierra. James Cameron se convirtió en el primer hombre en descender a una profundidad de 10,898 metros con una presión de 1072 bares en un vehículo tripulado, acción solo comparada con el aterrizaje del hombre en la luna.

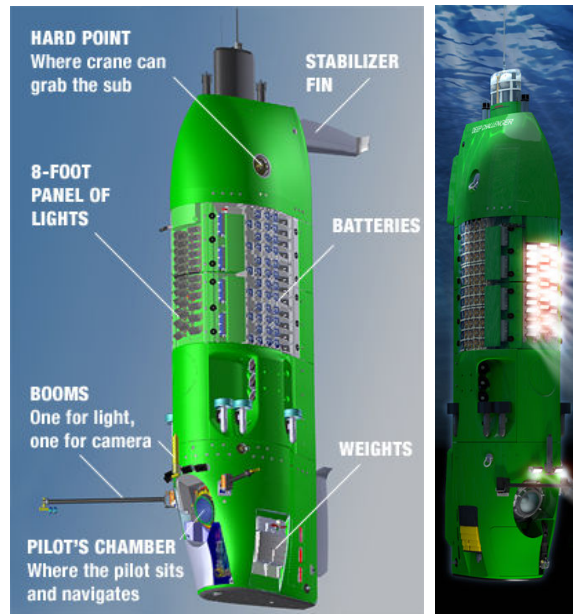


Figura 1.6: Deepsea Challenger en operación

La expedición a las fosas Marianas que realizara Cameron fue principalmente patrocinada por *National Geographic* y *Rolex*. Lamentablemente los resultados obtenidos de esta hazaña serán revelados hasta abril del 2013. Se cree que la misión no solo arrojará resultados para biólogos y vulcanólogos, sino también abrirá la puerta para que se investigue las profundidades del mar y sus riquezas aun desconocidas. Por años se ha invertido en la exploración espacial en busca de vida extraterrestre y hasta un nuevo planeta para vivir, pero nunca antes el hombre había podido llegar al punto más profundo de la tierra. En los años siguientes veremos como más descubrimientos serán posibles debido al avance de la tecnología submarina. Por ejemplo, en la actualidad diversos equipos y compañías compiten por el desarrollo de cardúmenes de robots submarinos.

1.3. Conceptos básicos para *AUVs*

En esta sección analizaremos conceptos básicos que deben tomarse en cuenta cuando se diseña o trabaja con vehículos marinos, tales como: flotabilidad, fuerzas hidrodinámicas, masa agregada y vortices.

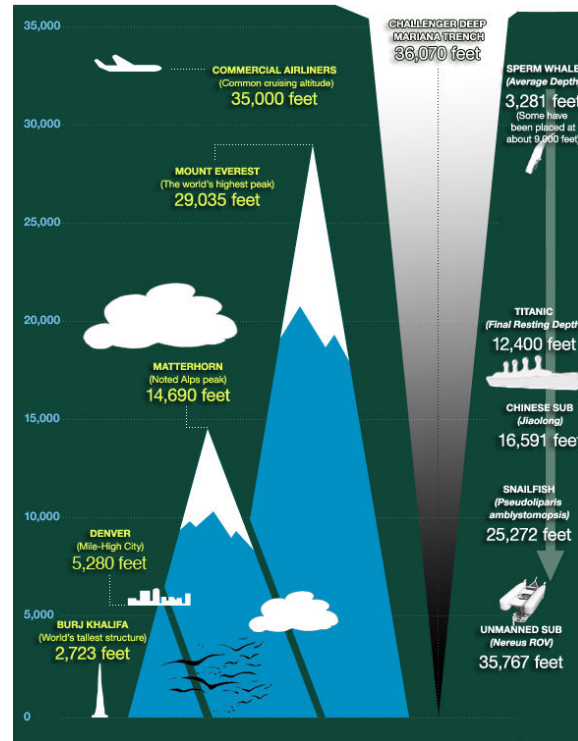


Figura 1.7: Imagen comparativa de la fosa de las Marianas

1.3.1. Flotabilidad

La magnitud de la fuerza de flotabilidad (B) lleva un cuerpo sumergido en agua a que este flote, según enuncia *El principio de Arquímedes*. Este principio afirma que un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido estático, será empujado con una fuerza ascendente igual al peso del volumen de fluido desplazado por dicho objeto. De este modo, cuando un cuerpo está sumergido en el fluido se genera un empuje hidrostático resultante de las presiones sobre la superficie del cuerpo. Este empuje actúa siempre hacia arriba y a través del centro de gravedad del cuerpo sumergido en el fluido con magnitud igual al peso del fluido desplazado. Que un cuerpo sumergido en agua flote también depende de la magnitud del peso del cuerpo (W), de esta manera podemos ver que si $B > W$ el cuerpo flotará, mientras que si $B < W$ el cuerpo se hundirá, en el caso de que $B = W$ el cuerpo se quedará donde esté, es decir, tendrá una posición neutra. En la Figura 1.8 se ilustra este fenómeno.

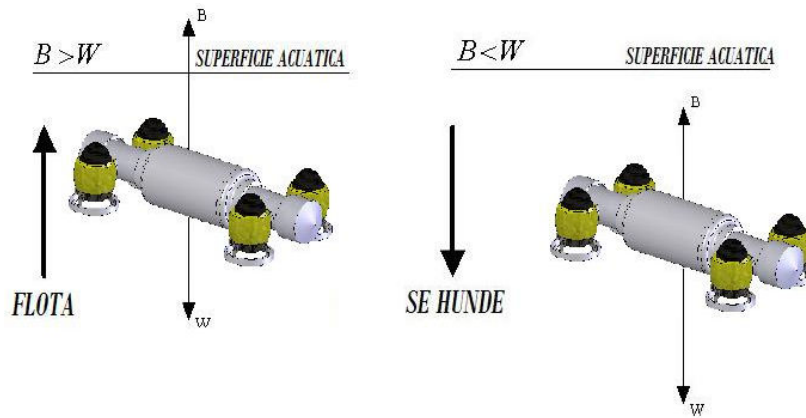


Figura 1.8: Efectos de la fuerza de flotabilidad y el peso en un cuerpo sumergido en agua

1.3.1.1. Estabilidad hidrostática

Asumiendo que el fluido en el que se encuentra sumergido el vehículo está en reposo, la estabilidad del vehículo inmerso en el fluido es afectado por la posición del centro de masa y el centro de la fuerza de flotabilidad. De esta manera si definimos a C_M como el centro de masa y a C_B como el centro de la fuerza de flotabilidad, se podrá observar que si C_M y C_B no se encuentran alineados verticalmente y además las fuerzas resultantes no se encuentran en equilibrio ($W \neq B$), esto provocará un par entre ellos lo que dará como resultado la inestabilidad del vehículo tal como se ilustra en la Figura 1.9.

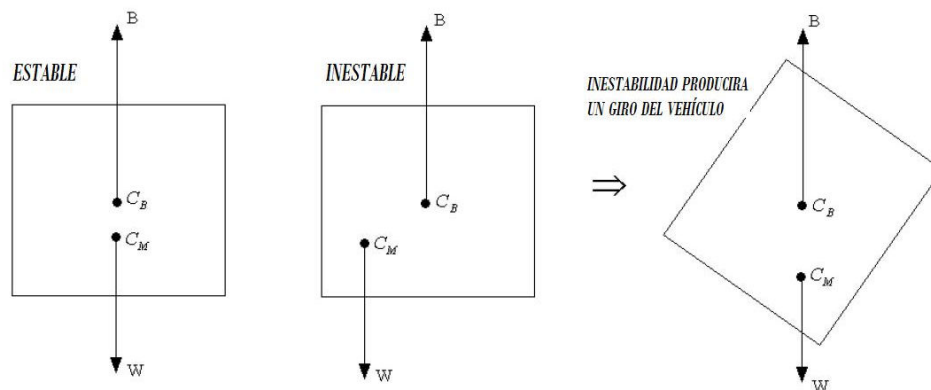


Figura 1.9: Posiciones estable e inestable de un cuerpo sumergido en un fluido

1.3.2. Fuerzas hidrodinámicas

Cuando un cuerpo se mueve inmerso en un líquido, existen fuerzas que afectan la dirección de movimiento. A estas fuerzas se le denominan fuerzas hidrodinámicas y son: arrastre y sustentación. La primera es la fricción entre el fuselaje y el medio dentro del que se mueve el vehículo. La segunda es la que mantiene el vehículo flotando, las fuerzas de amortiguamiento tienen una gran influencia en la dinámica del vehículo, debido a su naturaleza no lineal.

1.3.2.1. Vórtices

Un vórtice es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas. Como vórtice puede considerarse cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee vorticidad. La vorticidad es un concepto matemático usado en dinámica de fluidos que se puede relacionar con la cantidad de circulación o rotación de un fluido. La vorticidad se define como la circulación por unidad de área en un punto del flujo. Los vórtices generalmente se generan por la relación que existe entre el fuselaje y la velocidad a la cual se desplaza el *AUV* cuando se encuentra navegando. A menudo estos vórtices son representados como perturbaciones en el modelo de control, ya que son difícil de conocer y/o estimar.

1.3.3. Masa agregada

Otro fenómeno que afecta a los vehículos submarinos es la masa agregada, cuando un cuerpo sumergido en un fluido se mueve una cantidad del fluido que rodea su geometría se desplaza con él. La cantidad de fluido que se desplaza depende de la geometría, es así como la geometría de un vehículo es sumamente importante. Algunos autores aseguran que la geometría ideal para un vehículo submarino es una forma oval parecida a un huevo, la cual no es sencilla de realizar sin embargo, en la mayoría de los prototipos que se desarrollan se intenta imitar esta geometría.

1.4. Oceanografía: conceptos básicos

La tierra es el único planeta conocido hasta nuestros días el cual tiene el agua en 3 estados: solido, liquido y gaseoso, siendo el estado líquido el que más abunda. Un ejemplo de esto son los ríos, lagos, lagunas y océanos. Los océanos cubren dos terceras partes de la superficie terrestre, esto es alrededor del 70.8 % de la superficie terrestre. Por ejemplo, el océano Atlántico cubre el 16.2 %, mientras que el Pacífico un 32.4 %, el océano Indico el 14.4 % y entre el océano Ártico y Antártico se reparten el 7.8 %. Es interesante notar que tan solo el océano Pacifico cubre 3.2 % más de superficie que toda la superficie de tierra combinada.

El estudio de los océanos es de vital importancia ya que en mi punto de vista el futuro y supervivencia del ser humano esta ligado a él. Debido a que el 37 % de la población terrestre está asentado a sus orillas y un porcentaje un poco más alto vive de los recursos extraídos de él.

Se estima que hasta nuestros días se ha explorado entre un 3 y 5 % de toda la extensión de aguas oceánicas. Por ejemplo, en años recientes se descubrió billones de toneladas de manganeso en el suelo marino del océano Pacífico cerca de las islas de Hawaii, este descubrimiento fue posible gracias a la intervención y exploración con vehículos submarinos no tripulados, ver [107]. Son innumerables los beneficios que se pueden obtener del mar. Es por ello que es importante el estudio del mismo. No solo por los beneficios que de él se pueden obtener, sino también, por que determina los factores y parámetros de diseño a tomar en cuenta en el desarrollo de un vehículo submarino. En las secciones posteriores se describirán algunas de características mas importantes a tomar en cuenta cuando se diseñan *AUVs*.

1.4.1. Factores que afectan el desempeño de un *AUV*

En un ambiente como es el océano existen muchas fuerzas y fenómenos que pueden perturbar el buen funcionamiento de un vehículo submarino, ejemplo de estas fuerzas y fenómenos son: la flotabilidad, el amortiguamiento hidrodinámico, la masa agregada, la salinidad, el cambio de temperatura, etc.

1.4.1.1. Densidad = ϕ (salinidad, temperatura y profundidad)

La densidad es definida como la cantidad de masa por unidad de volumen, en el sistema internacional (SI) su unidad de medición es kg/m^3 . En el caso del agua de mar esta depende de la salinidad, temperatura y profundidad. A temperatura y profundidad constante, la densidad varía con la salinidad del agua. La determinación de la densidad es importante porque define la flotabilidad neutra del *AUV*. La Figura 1.10 ilustra la interacción entre estas 3 variables en aguas oceánicas.

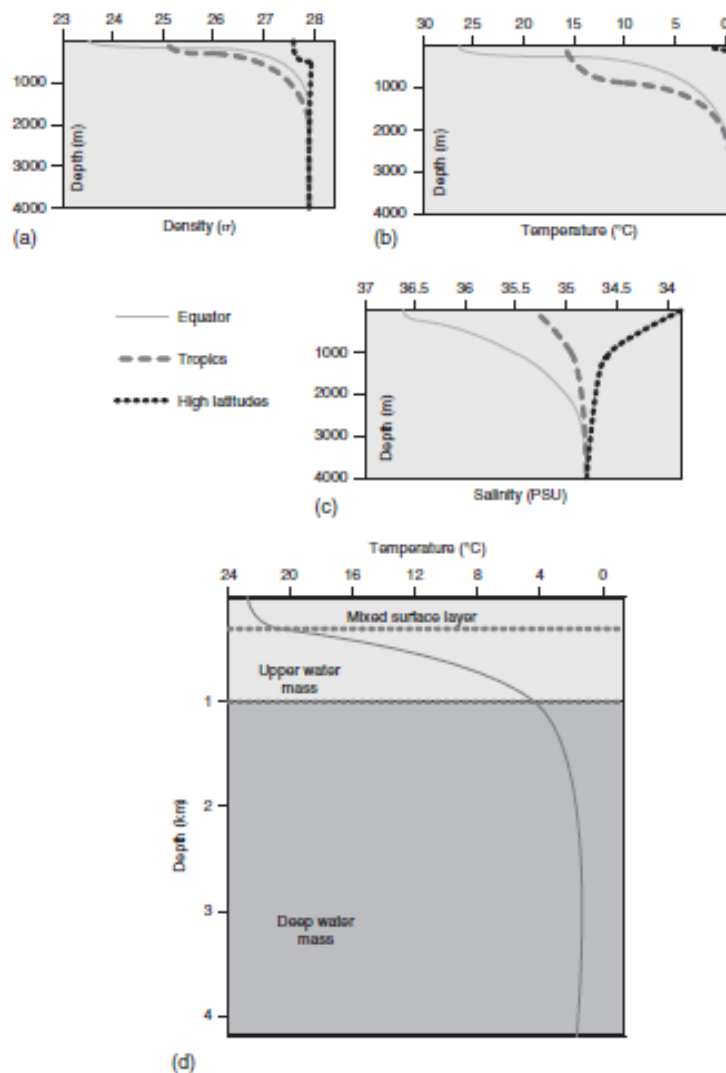


Figura 1.10: Comportamiento de los océanos

El océano conforma un 97 % de la hidrosfera de la tierra, esta masa de agua está com-

puesta por una solución como base agua pura con un porcentaje de algunos minerales disueltos en los que destaca el cloruro sódico, también conocido como sal de mesa. La Tabla 1.3 muestra los principales componentes de esta.

Elemento	Peso en gramos
Agua pura	965.31
Elementos de mayor concentración	
Cloro	19.1
Sodio	10.62
Magnesio	1.28
Azufre	2.66
Calcio	0.40
Potasio	0.38
Elementos de menor concentración	
Traza de concentración	.01
Total en gramos	1000

Tabla 1.3: Componentes del agua de mar

Históricamente, la salinidad del agua se media en partes por millón (PPM) pero actualmente es más utilizado el termino unidades prácticas de salinidad (PSU, por sus siglas en inglés). La importancia de salinidad está relacionada con el cambio en la densidad; es así, como el 99% de océano tiene una salinidad entre 33 y 37 PSU. La variación de la salinidad es importante ya que con la profundidad la temperatura cambia y por ende la salinidad. Cabe mencionar que el cambio de salinidad no solo es debido al cambio en la profundidad, sino también, en la latitud y longitud en la que se encuentre operando el *AUV*, lo cual está permanentemente relacionado a la temperatura del océano. Debido a esto se presentan fenómenos como la **termoclina** (ver figura 1.11a) que es una capa de agua en la cual la temperatura cambia abruptamente y la **haloclina** (ver figura 1.11b) que es una capa de agua en la que esta cambia de salinidad abruptamente. El fenómeno anterior sucede muy a menudo en cenotes donde el agua del cenote se mezcla con la del mar o en desembocaduras de ríos.

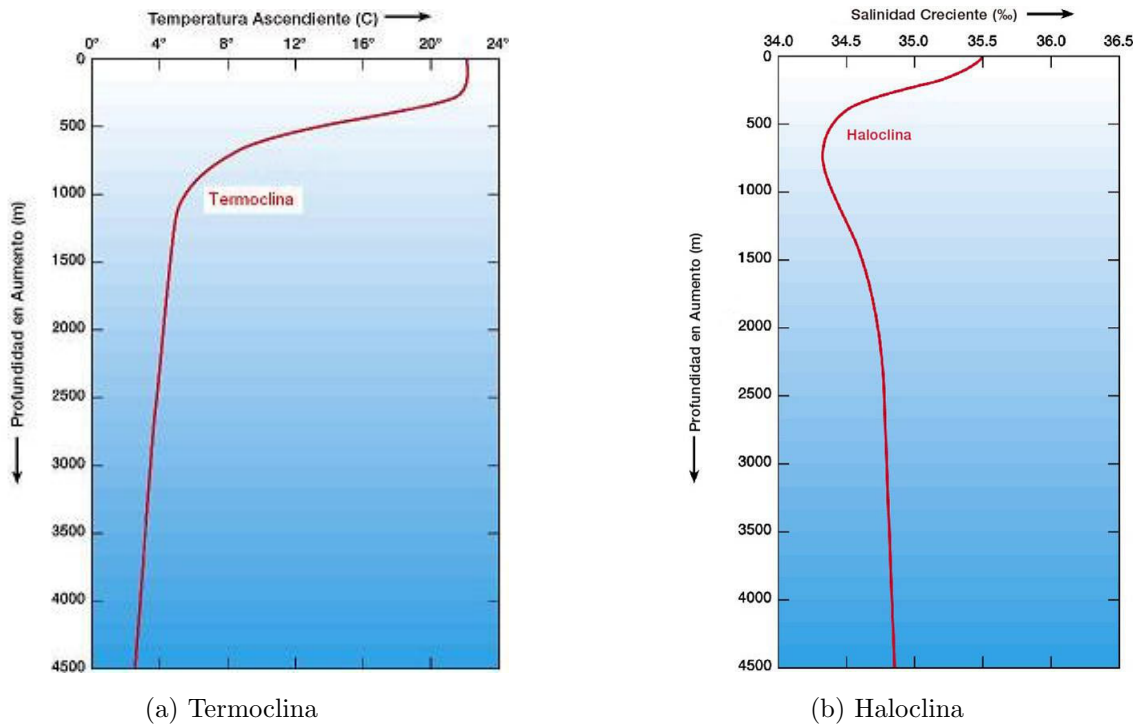


Figura 1.11: Fenómenos de termoclina y haloclina

Debido a estos fenómenos de cambio de salinidad y temperatura, el sonido experimenta desvíos y en ocasiones atenuación en la potencia del mismo. Cabe aclarar que no siempre es el caso ya que en ocasiones la termoclina es utilizada como canal de comunicaciones.

La presión submarina es causada por la fuerza ejercida por el peso del fluido, en este caso el agua, esta presión es una medición directa de la profundidad y puede ser medida como absoluta o presión ambiental. A nivel del mar la presión medida es de 1 bar o 14.7 psi y crece a razón de 1 bar por cada 10 metros de profundidad como lo muestra la relación descrita en la Figura 1.12.

1.4.2. Óptica submarina y visibilidad

La transmisión de ondas electromagnéticas a través del agua se puede englobar en tres fenómenos que se presentan cuando el vehículo navega, estos son: absorción, refracción y dispersión.

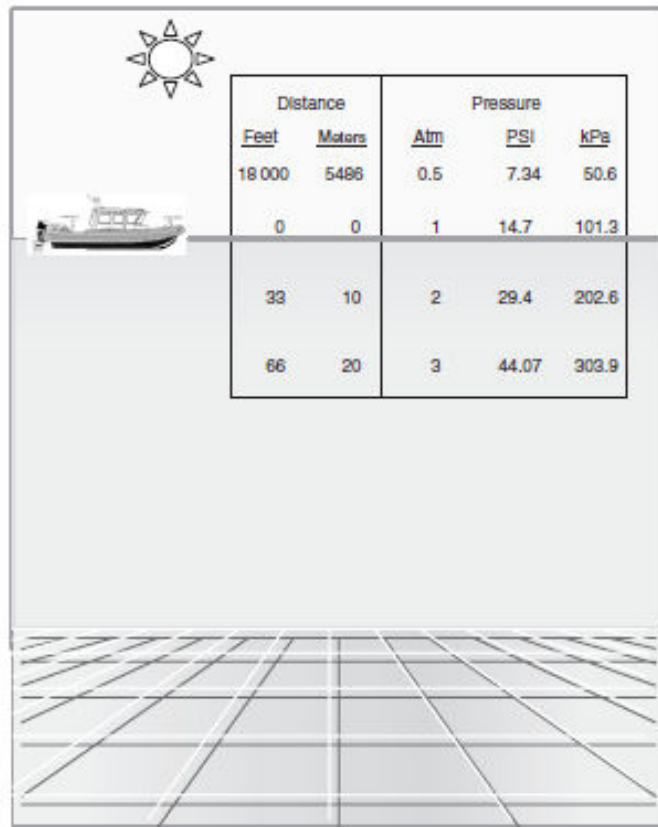


Figura 1.12: Relación de profundidad contra presión hidrostática

Absorción: La transmisión de ondas electromagnéticas a través del agua varía con la longitud de onda. Teniendo como la mejor penetración las ondas de longitud muy baja; es por esto que las ondas de radio y GPS no están disponibles bajo la superficie marina. La Figura 1.13 muestra el espectro de luz visible del cual se observa que los colores que pueden percibirse a mayor profundidad son los que se encuentran en la vecindad del azul y el verde. Sin tener en cuenta la dispersión, de la cual se considerará más tarde, a 1 metro de profundidad el 60 % de la energía es absorbida, dejando solo el 40 %. Después de 10 m, solo el 20 % de la energía total permanece. Cuando se han alcanzado los 100 m, el 99 % de la energía luminosa ha sido absorbida, donde solo los colores azul y verde pueden distinguirse.

Refracción: La luz viaja a mucho menor velocidad en el agua que en el aire esto es por que tienen diferentes índices de refracción, debido a que la luz en el océano proviene del sol, cuando esta pasa del aire al agua, se refracta perdiendo velocidad y penetración.

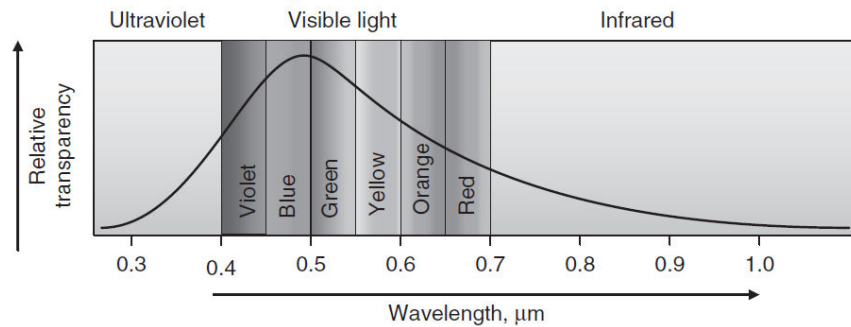


Figura 1.13: Espectro de Luz visible

Dispersión: El agua de mar al ser un cuerpo que tiene elementos disueltos, provoca que la luz rebote contra estas pequeñas partículas suspendidas. Considerando esta suspensión de partículas podemos hablar de turbiedad. Debido a esto, la luz es obstaculizada poco a poco hasta perder toda su potencia inicial, hasta que el haz de luz se extingue.

1.4.3. Corrientes subacuáticas y mareas

La principal fuente generadora de corrientes subacuáticas es el aire en la superficie, pero de igual manera estas pueden ser causadas por cambio en la densidad del agua, este último cambio es causado por temperatura o salinidad. Las mareas están relacionadas con el ascenso y descenso vertical del agua debido a los efectos gravitacionales que tiene la luna en la tierra.

La velocidad del agua es la velocidad a la cual esta recorre cierta distancia en un tiempo dado, generalmente es medida en m/s o *knots*. Muchas de las operaciones que se llevan a cabo en el mar están gobernadas por el estado del mar (*sea state*, S1, S2, ..., S12), el cual es medido por la escala de *Beaufort*. Esta escala se muestra en la Tabla 1.4. Las olas son medidas a partir de muchas características, por ejemplo: altura de la ola, longitud de onda y periodo, estas características dependen de factores como la velocidad del viento, el periodo de tiempo que le lleva disiparse, etc.

Tabla 1.4: Escala *Beaufort*

Beaufort	Vel del viento (m/s)	Desc. de Marineros	Altura de la ola(m)	Efecto en el mar
0	< 1	Calma	0 m	Mar como espejo
1	0.3 - 2	Aire ligero	0 - 0.2 m	Pequeñas ondulaciones sin espuma
2	2.0 - 3.0	Brisa ligera	0.0 - 0.5 m	Ondulaciones pequeñas con apariencia vidriosa en la cresta, sin romper
3	3.0 - 5.0	Brisa suave	0.5 - 1 m	Ondulaciones largas, la cresta empieza a romper, con pequeño espumeo
4	6.0 - 8.0	Brisa moderada	1.0 - 2.0 m	Olas pequeñas que se empiezan a hacer largas y con espumeo considerable
5	8.1 - 10.7	Brisa fresca	2.0 - 3.0 m	Olas moderadas que toman tiempo en formarse con mucho espumeo y brisa marina
6	10.8 - 13.6	Brisa fuerte	3.0 - 4.0 m	Olas grandes se empiezan a formar, espumeo por doquier y aumento en la brisa marina
7	13.9 - 16.9	Cerca de vendaval	4.0 - 5.5 m	El mar se empieza a amontonar, la espuma blanca es soplada en líneas
8	17.2 - 20.6	Vendaval	5.5 - 7.5 m	Olas moderadamente altas
9	20.8 - 24.4	Vendaval fuerte	7.0 - 10.0 m	Olas altas cuyas crestas se enrollan para crear espuma.
10	24.5 - 28.4	Tormenta	9.0 - 12.5 m	Olas muy altas

Continúa en la siguiente página

Tabla 1.4 – continuación de la página previa

Beaufort	Vel del viento (m/s)	Desc. de Marineros	Altura de la ola(m)	Efecto en el mar
11	28.5 - 32.6	Tormenta violenta	11.5 -16.0 m	
12	32.7 >	Huracán	14.0 m $\dot{\zeta}$	Olas enormes, visibilidad nula, aire lleno de brisa y espuma.

1.5. Discusión

El interés en la concepción, control y navegación de vehículos submarinos se ha incrementado considerablemente durante los últimos años. Esto ha sido posible en su mayor parte a los avances tecnológicos que día con día nos sorprenden. A nivel internacional diferentes equipos de investigación (tanto académicos como empresariales) se han dado a la tarea de desarrollar prototipos submarinos capaces de navegar de manera semi o completamente autónoma. Surgiendo de esta manera diferentes competiciones (estudiantiles o no) que integran diversas misiones que deben ser desarrolladas de manera autónoma por vehículos submarinos.

Nuestro país tiene una necesidad inmensa en el desarrollo de prototipos submarinos para la exploración de nuestras aguas territoriales. Lamentablemente solo pocas universidades concentran investigación en esta área. Esto es debido, generalmente al poco apoyo que se recibe. Desde hace 5 años en el laboratorio LAFMIA se comenzó con la concepción, el desarrollo y el control de vehículos submarinos. Varias tesis de maestría y algunas de doctorado, incluyendo la presente, visan sobre este tema de investigación. En los subsiguientes capítulos se describirá los resultados (teóricos y experimentales) obtenidos durante estos 5 años de investigación en la navegación autónoma de vehículos submarinos.

Representación matemática de vehículos submarinos

Representar matemáticamente el comportamiento de un vehículo submarino requiere del estudio de la estática y la dinámica del cuerpo sumergido en el agua. Por ejemplo, una fuerza que resulta del estudio de la estática del vehículo es la del par de restitución, que es la interacción entre la flotabilidad (*buoyancy*) y el peso del vehículo (*weight*). Esta es importante en el análisis de estabilidad y navegación. Por otra parte también se deben tomar en cuenta las fuerzas que originan el movimiento del vehículo, en otras palabras la dinámica del cuerpo. Es común dividir la dinámica del vehículo en dos partes: **cinemática**, la que es referente a cómo se mueve el vehículo marino y la **cinética**, que es referente al análisis de la fuerzas que originan el movimiento.

En este capítulo nos enfocaremos en describir los aspectos del modelo matemático general de cualquier vehículo marino, esto es, barcos, plataformas de exploración, submarinos, etc. Así mismo se presentará la representación matemática de los vehículos que he utilizado a lo largo de mi tesis.

Cabe recordar que cuando representamos en ecuaciones un sistema físico, este será solo una aproximación del sistema real (algunos dirían una caricatura) y que la complejidad de este dependerá de la aplicación deseada, de esta manera, se puede clasificar los modelos matemáticos dependiendo de su uso.

2.1. Clasificación

Modelo para simulación: Este tipo de modelo es la descripción más precisa de un sistema, por ejemplo; un modelo de 6 GDL de alta fidelidad para simulación de movimientos acoplados en el dominio del tiempo incluye la dinámica del vehículo marino, el sistema de propulsión, las mediciones del sistema y las fuerzas ambientales debido al viento, las olas y las corrientes oceánicas, que en la mayoría de las ocasiones son tomadas como perturbaciones. Este tipo de modelo también suele incluir otras características que no siempre son usadas o no tienen gran impacto en el diseño del control o en el diseño de observadores. Con este modelo debe ser posible reconstruir la respuesta del sistema en función del tiempo, y se debe poder simular fallas o eventos como lo son colisiones o errores de señales en la medición. De igual manera este tipo de modelo debe incluir efectos del fluido como son la masa agregada y la disipación viscosa. Típicamente este modelo tiene de 50 a 200 ecuaciones diferenciales ordinarias, mientras que un modelo para navegación puede ser representado en 6 GDL con 12 ODEs para posición y velocidades generalizadas. En conclusión, algunos estados son necesarios para describir la interacción de fuerzas actuantes en el cuerpo y fuerzas ambientales, pero aun así el número de estados será menor a 50 para naves marítimas.

Modelo para diseño control: El modelo para control es una representación matemática de orden reducido o versión simplificada de la versión para simulación, es usado para la concepción de leyes de control para la navegación autónoma, por ejemplo; en su forma más simple este modelo es usado para calcular un conjunto de ganancias constantes para un controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID). Controles más sofisticados hacen uso del modelo dinámico para generar señales con retroalimentación hacia adelante (*feedforward*) y retroalimentación hacia atrás (*feedback*). El número de ODEs utilizadas en un control convencional basado en modelo para vehículos marítimos es menor que 20. Por ejemplo, un controlador PID requiere dos estados uno para el integrador y otro para el filtro pasa bajas utilizado para limitar la amplificación del ruido. Por consecuencia, regular un sistema con 6 GDL

necesitará tan solo de 12 ODEs.

Modelo para diseño de observadores: Este modelo es en general diferente que el utilizado para controlar debido a que el propósito que este debe cumplir es el de capturar la dinámica adicional asociada con los sensores y sistema de navegación así como también las perturbaciones. Es una versión simplificada del modelo de simulación donde la mayor atención está asociada a la precisión del modelado de la medición del ruido, detección de fallas (inclusive las fallas debidas a la capacidades del *dead-reckoning*) filtrado y predicción de trayectoria. Para navíos, el observador basado en modelo usualmente incluye una representación matemática de la perturbación donde el objetivo principal es estimar las perturbaciones debido a las olas, el aire y las corrientes oceánicas.

Modelo para validación experimental: El modelo para aplicación, es una representación que se desprende del de simulación. Toma valores obtenidos por calculo numérico (software CFD) o por aproximaciones matemáticas de la geometría del vehículo. Generalmente tiene pocas ODEs, y depende de la capacidad de cálculo embarcado en el vehículo portador para resolver la tarea asignada.

2.2. Convención para vehículos marinos

Cuando se realiza un trabajo científico es de gran importancia someterlo a critica y revisión por especialistas del área para poder tener una mejor aceptación de los resultados obtenidos, y debe poder expresarse utilizando la notación estándar del área científica que estemos abarcando. De esta manera se han definido normas, estándares y convenciones a fin de que todos podamos homogeneizar las ideas y los resultados científicos. En el campo de los vehículos marinos se utiliza la notación descrita por la **Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos de los Estados Unidos (SNAME**, por sus siglas en inglés). En la siguiente tabla se describe la notación más utilizada.

En el movimiento de cualquier vehículo marino se involucran 6 Grados De Libertad (GDL), ver Tabla 2.1, que determinan la posición y orientación del vehículo en el espacio. De esta manera, las tres primeras coordenadas y sus correspondientes derivadas describen

	Fuerzas y Momentos	v_1, v_2	η_1, η_2
Avance (<i>surge</i>), es el movimiento en la dirección del eje x	X	u	x
Deriva (<i>sway</i>), es el movimiento en la dirección del eje y	Y	v	y
Arfada (<i>heave</i>), es el movimiento en la dirección del eje z	Z	w	z
Balance o Rólideo (<i>roll</i>), es la rotación alrededor del eje x	K	p	ϕ
Cabeceo (<i>pitch</i>), es la rotación alrededor del eje y	M	q	θ
Guiñada de rumbo (<i>yaw</i>), es la rotación alrededor del eje z	N	r	ψ

Tabla 2.1: Notación utilizada para vehículos marinos de acuerdo a la **SNAME**

la posición y la velocidad de traslación a lo largo de los ejes x , y y z , por otro lado, las últimas tres coordenadas junto con sus derivadas describen la rotación angular y la velocidad rotacional entorno a los ejes x , y y z .

2.3. Cinemática del cuerpo rígido

Para representar matemáticamente el movimiento de un vehículo marino se utiliza de manera general los 6 GDL en el espacio. Un primer paso antes de comenzar a obtener la representación matemática es el de definir los marcos coordenados de referencia, lo cual facilitará la definición de las posiciones y velocidades de un sistema relativo a otro [36] [100]. Por ejemplo, para realizar una navegación autónoma con mediciones absolutas es natural hacer referencia a la posición y velocidad con respecto a las coordenadas terrestres, en caso de utilizar información provenientes de sensores con mediciones relativas se tienen que definir nuevos marcos de referencia. Una definición usual es la siguiente:

Marco inercial centrado en la tierra: *Earth-centered inertial (ECI)* $\{i\} = (x_i, y_i, z_i)$ Es un marco fijo en el espacio, el origen $\{i\}$ se encuentra fijo en el centro de la tierra con su eje z apuntando hacia el polo norte y a lo largo del eje de rotación de la tierra, el eje x apunta hacia el equinoccio vernal. El eje y completa un sistema de regla mano derecha. Este marco se considera inercial, esto es, un marco

de referencia no acelerado donde la ley de Newton es válida.

Marco centrado y fijo a la tierra: *Earth-centered Earth-fixed (ECEF)* $\{e\} = (x_e, y_e, z_e)$ Similar al marco *ECI* el *ECEF* está centrado en la tierra. Este marco es definido con el eje x apuntando hacia la intersección de longitud 0 (el meridiano de Greenwich) y latitud 0 (el ecuador). El eje z apunta a lo largo del eje de rotación de la tierra, y el eje y completa un sistema coordenado ortogonal de mano derecha. El marco *ECEF* rota relativo al marco *ECI* con una velocidad de rotación $\omega_e = 7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$. Las coordenadas cartesianas y geodésicas (longitud, latitud y altura) son utilizadas para representar una posición en el marco *ECEF*.

Marco Norte, Este, Profundidad: *North-East-Down (NED)* $\{n\} = (x_n, y_n, z_n)$ Este marco está definido relativo al sistema mundial de coordenadas geodésicas (**WGS84**, por sus siglas en inglés). El eje z apunta en dirección hacia dentro y perpendicular al plano tangente con la superficie de la tierra de la posición en donde se encuentra el vehículo, el eje x apunta en dirección del norte verdadero. El eje y apunta en dirección Este para completar un sistema coordenado ortogonal de mano derecha.

Marco fijo en el cuerpo: *BODY*. El marco fijo en el cuerpo $\{B\} = (x_b, y_b, z_b)$ es aquel fijo al vehículo, el cual se traslada y rota libre con respecto a *NED* con los ejes x, y, z usualmente escogidos para coincidir con los principales ejes de inercia. El eje x apunta en dirección hacia adelante, el eje y apunta hacia estribor y el eje z apunta hacia abajo. La posición y orientación del vehículo es descrita relativo al marco inercial $\{n\}$ para navegación local.

Marco en los actuadores: *Thrust*. El marco fijo en los actuadores $\{T\} = (x_t, y_t, z_t)$ es aquel que representa las fuerzas ejercidas por los propulsores o superficies de control. Este marco rota en el caso de que los actuadores lo hagan en torno al eje que lo mantiene sujeto al *AUV*. Este sistema es coordenado ortogonal de mano derecha y sus ejes son definidos paralelos al marco del cuerpo **B**.

La Figura 2.1 en conjunto con la Tabla 2.2 resumen lo descrito anteriormente. Para nuestros fines de estudio, definiremos el marco *NED* como el marco inercial \mathcal{I} , y el marco

fijo en el cuerpo **BODY** como \mathcal{B} , ver Figura 2.2.

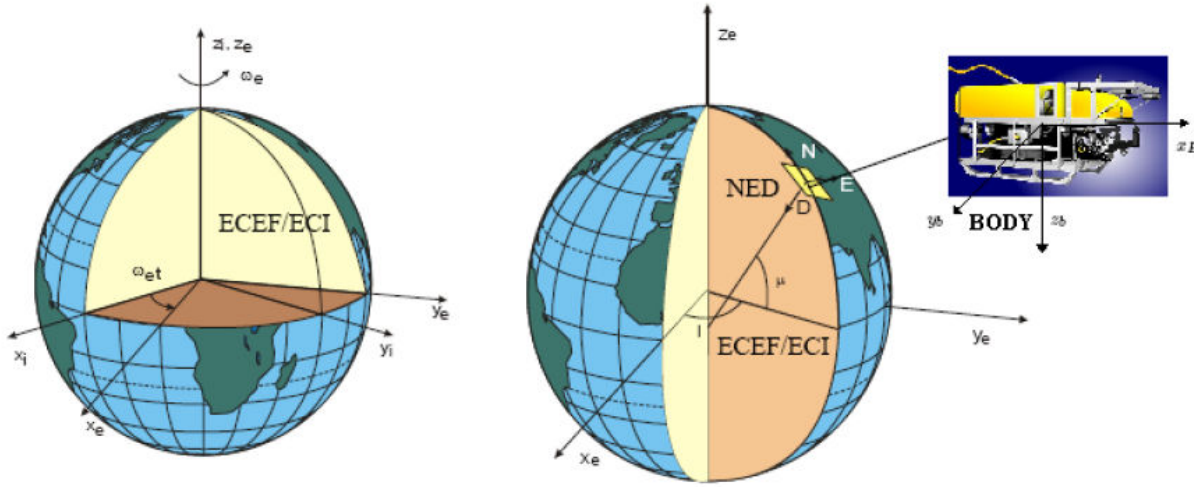


Figura 2.1: Marcos de referencia

La colocación de estos marcos sugiere que la descripción de la posición y la orientación del vehículo debe ser con respecto al marco inercial \mathcal{I} , mientras que la velocidad lineal y angular se debe expresar en coordenadas del marco fijo en el cuerpo \mathcal{B} . Basado en la notación de la Tabla 2.1 definiremos los siguientes vectores que describen el movimiento del vehículo en 6 GDL:

$$\begin{aligned}
 \eta &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T; & \eta_1 &= [x, y, z]^T; & \eta_2 &= [\phi, \theta, \psi]^T \\
 \nu &= [\nu_1^T, \nu_2^T]^T; & \nu_1 &= [u, v, w]^T & \nu_2 &= [p, q, r]^T \\
 \tau &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T; & \tau_1 &= [X, Y, Z]^T & \tau_2 &= [K, M, N]^T
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

donde $\eta \in \mathcal{I}$ describe la posición y la orientación del vehículo, $\nu \in \mathcal{B}$ representa la velocidad lineal y angular, τ define las fuerzas y momentos externos actuantes sobre el cuerpo.

2.3.1. Matriz de rotación

Considerando una base $\mathcal{P} = \{x_p, y_p, z_p\}$ en el espacio tridimensional, para todo vector \mathbf{u} se define $\mathbf{u}^{\mathcal{P}}$ como las coordenadas de \mathbf{u} relativas a la base \mathcal{P} . Las matrices de transformación permiten el cambio de coordenadas entre 2 marcos coordenados. Entonces si consideramos dos bases $\mathcal{P} = \{x_p, y_p, z_p\}$ y $\mathcal{Q} = \{x_q, y_q, z_q\}$, la matriz de transformación entre \mathcal{P} y \mathcal{Q} , se expresa como $\mathcal{R}^{\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{Q}}$. Esto es que para un vector \mathbf{u} en la base \mathcal{P} , la trans-

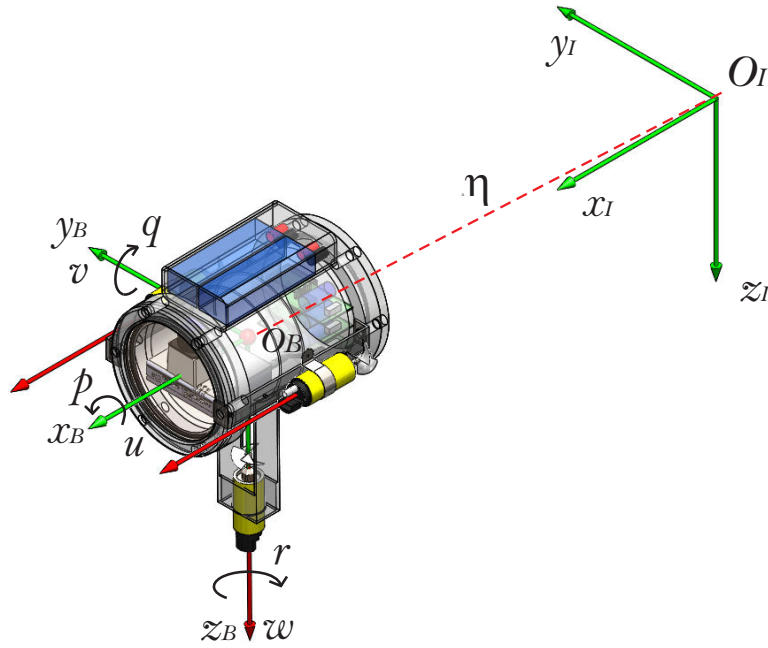


Figura 2.2: Marcos de referencia locales

Frame	Vector	Definición
BODY	$v_{b/n}^b = [u, v, w]$	Velocidades de desplazamiento <i>surge</i> , <i>sway</i> y <i>heave</i>
BODY/NED	$\omega_{b/n}^b = [p, q, r]$	Velocidades angulares <i>roll</i> , <i>pitch</i> y <i>yaw</i>
NED	$v_{b/n}^n = [v_N, v_E, v_D]$	Velocidades norte, este y profundidad
NED/ECEF	$\omega_{n/e}^n = [\omega_N, \omega_E, \omega_D]$	Función de cambio en long. y latitud
ECEF	$v_{b/e}^e = [v_{x_e}, v_{y_e}, v_{z_e}]$	Velocidad en el marco proporcionado por el GPS
ECEF/ECI	$\omega_{e/i}^e = [0, 0, \omega_e]$	ω_e es la velocidad angular de la tierra

Tabla 2.2: Relación entre vectores de posición y orientación

formación de este vector en el marco \mathcal{Q} se puede obtener mediante la siguiente relación (ver [92]):

$$\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{Q} = \mathcal{R}^{\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{Q}} \mathbf{u}^{\mathcal{P}} \quad (2.2)$$

Si la transformación cumple con lo siguiente:

$$(\mathcal{R}^{\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{Q}})^{-1} = (\mathcal{R}^{\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{Q}})^T \quad (2.3)$$

$$\det(\mathcal{R}^{\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{Q}}) = 1 \quad (2.4)$$

entonces se dice que esta transformación pertenece al grupo especial ortogonal $SO(3)$, ver [92].

2.3.2. Matriz de transformación

Para poder describir la orientación del vehículo en el espacio se puede utilizar los ángulos de Euler, ϕ (alabeo), θ (cabeceo) y ψ (guiñada). Sin embargo estos presentan una singularidad cuando la rotación sobre y (cabeceo) es igual a $\pm\frac{\pi}{2}$ rad. Por otro lado, este intervalo resulta apropiado para el rango de operación en el cual nuestro vehículo va a operar, además se asume que su estado inicial es cercano al punto de estabilidad (0°). Para saber la orientación y la posición con respecto a \mathcal{I} dadas las coordenadas del cuerpo y viceversa, se empleará una secuencia de multiplicaciones de ángulos de Euler.

$$\mathcal{R}^{\mathcal{I} \rightarrow \mathcal{B}} = \mathcal{R}^{\mathcal{I} \rightarrow 1} \cdot \mathcal{R}^{1 \rightarrow 2} \cdot \mathcal{R}^{2 \rightarrow \mathcal{B}} \quad (2.5)$$

donde $\mathcal{R}^{\mathcal{I} \rightarrow 1}$ es la rotación alrededor del eje z , ψ (guiñada) cuyo dominio es definido cuando $-\pi \leq \psi \leq \pi$. Esta rotación produce la siguiente matriz de transformación.

$$R_\psi = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$\mathcal{R}^{1 \rightarrow 2}$ representa la rotación alrededor del eje y , θ (cabeceo) cuyo dominio es definido cuando $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$. Esta rotación produce la siguiente matriz de transformación.

$$R_\theta = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Finalmente $\mathcal{R}^{2 \rightarrow \mathcal{B}}$ representa la rotación alrededor del eje x , ϕ (alabeo) cuyo dominio es definido cuando $-\pi \leq \theta \leq \pi$. Esta rotación produce la siguiente matriz de transformación.

$$R_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Sustituyendo las expresiones (2.6), (2.7) y (2.8) en (2.3.2) obtenemos la matriz que transforma cualquier vector de \mathcal{I} al cuerpo \mathcal{B} :

$$\mathcal{R}^{\mathcal{I} \rightarrow \mathcal{B}} = \begin{pmatrix} c\theta c\psi & c\theta s\psi & -s\theta \\ c\psi s\theta s\phi - c\phi s\psi & c\phi c\psi + s\theta s\phi s\psi & c\theta s\phi \\ s\phi s\psi + c\phi c\psi s\theta & c\phi s\theta s\psi - c\psi s\phi & c\theta c\phi \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

donde, $c(\bullet) = \cos(\bullet)$ y $s(\bullet) = \sin(\bullet)$. La matriz que transforma del cuerpo \mathcal{B} al inercial \mathcal{I} está dado por la siguiente matriz ortonormal:

$$\mathcal{R}^{\mathcal{B} \rightarrow \mathcal{I}} = \begin{pmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - c\phi s\psi & s\phi s\psi + c\phi c\psi s\theta \\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\theta s\phi s\psi & c\phi s\theta s\psi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Además de las matrices que transforman la rotación del marco del cuerpo con respecto al inercial y viceversa, se debe considerar la matriz que transforma la velocidad angular en el cuerpo hacia el vector de velocidades angulares de *Euler*. Esta representación es expresada por la siguiente transformación:

$$\mathcal{R}^{\nu_2 \rightarrow \eta_2} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Para finalizar con las matrices de transformación, se definirá a J como la matriz que transforma los 6 GDL del marco del cuerpo hacia el marco inercial como:

$$J = \begin{pmatrix} \mathcal{R}^{\mathcal{I} \rightarrow \mathcal{B}} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \mathcal{R}^{\nu_2 \rightarrow \eta_2} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Con esta notación, se considera que el vehículo posee la característica de que sus propulsores pueden rotar paralelo al eje $y_{\mathcal{B}}$, por esta razón existen 2 matrices que transforman esta rotación del marco fijo en el motor $O_{\mathcal{T}}$ hacia el marco del cuerpo \mathcal{B} las cuales se describen a continuación:

$$R_{\alpha} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$R_\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$R_\gamma^T = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

2.4. Representación matemática

El modelo dinámico en términos del marco del cuerpo (\mathcal{B}) es obtenido a partir de las ecuaciones de movimiento de Newton-Euler, y es expresado por la siguiente ecuación, ver [35]:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + w \quad (2.16)$$

$$M = M_{RB} + M_A \quad C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu) \quad (2.17)$$

$$D(\nu) = D_P(\nu) + D_S(\nu) + D_W(\nu) + D_M(\nu) \quad (2.18)$$

donde, M es la matriz de inercia, C representa la matriz de coriolis, D define la matriz de amortiguamiento hidrodinámico, g concierne al vector de fuerzas hidrostáticas, τ contiene el vector de entradas de control y w es el vector de perturbaciones ambientales (olas y corrientes submarinas).

2.4.1. Matriz de inercia

Esta matriz está constituida por 2 elementos: la matriz de masa e inercia del cuerpo rígido M_{RB} y la matriz debida a la energía cinética del fluido (masa agregada) M_A . Esta relación es descrita por:

$$M = M_{RB} + M_A \quad (2.19)$$

Un vehículo que se encuentra completamente sumergido en un fluido es asociado con la energía cinética del mismo. De esta manera se pueden obtener los términos de masa agregada ya que cualquier movimiento del vehículo provocará un movimiento del fluido en sentido contrario. La energía cinética de un fluido T_A puede ser expresada con la siguiente forma cuadrática, ver [65]

$$T_A = \frac{1}{2} \nu^T M_A \nu \quad (2.20)$$

Recordemos que ν es la velocidad lineal o rotacional del cuerpo. Por otro lado M_A es descrita por la siguiente matriz de inercias:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{p}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{q}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{r}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

En general, el movimiento en 6 GDL de un vehículo submarino que se desplaza con gran velocidad, tendrá una dinámica no lineal y acoplada. Sin embargo, en aplicaciones como los ROVs o AUVs las velocidades de traslación y de rotación del vehículo son pequeñas. Si es el caso en que la geometría del vehículo posea 3 planos de simetría, entonces se pueden despreciar la aportación de los elementos fuera de la diagonal principal de la matriz (2.21), pudiéndose reescribir como:

$$M_A = -diag \{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\} \quad (2.22)$$

2.4.2. Matriz de coriolis

Coriolis es una fuerza de inercia que actúa perpendicular a la dirección del movimiento de un cuerpo. Esta fuerza es proporcional a la velocidad y a la rotación del sistema de coordenadas del vehículo con respecto al sistema de referencia. Esta matriz se compone por la matriz de Coriolis de masa añadida C_A y la matriz de Coriolis de cuerpo rígido C_{RB} . Entonces se tiene que:

$$C = C_A + C_{RB} \quad (2.23)$$

donde

$$C_A(\nu) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

con

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 &= X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 &= X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 &= X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 &= X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 &= X_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \end{aligned}$$

De la misma forma C_{RB} puede ser descrita por la siguiente ecuación (ver [35]).

$$C_{RB} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_gq + z_gr) & m(y_gp + w) & m(z_gp - v) \\ m(x_gq - w) & -m(z_gr + x_gp) & -m(z_gq + u) \\ m(x_gr + v) & m(y_gr - u) & m(x_gp + y_gq) \\ m(y_gq + z_gr) & -m(x_gq - w) & -m(x_gr + v) \\ -m(y_gp + w) & m(z_gr + x_gp) & -m(y_gr - u) \\ -m(z_gp - v) & m(z_gq + u) & m(x_gp + y_gq) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_{zz}r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_{yy}q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_{zz}r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_{xx}p \\ -I_{yz} + I_{xy}p - I_{yy}q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_{xx}p & 0 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

2.4.3. Matriz de amortiguamiento hidrodinámico

Cuando un vehículo submarino se está moviendo a través de un fluido, se presentan fuerzas que se oponen a la dirección del movimiento del vehículo, estas se denominan fuerzas de amortiguamiento hidrodinámico. La fuerza de amortiguamiento hidrodinámico se compone de dos términos: arrastre y sustentación (*Drag and lift* por su notación en inglés).

La fuerza de amortiguamiento hidrodinámico tiene un efecto significativo en la dinámica del vehículo que puede llegar a producir no linealidades. Se propone una simplificación en los parámetros de la fuerza de amortiguamiento hidrodinámico, esta consiste en tomar la diagonal principal. Debido a que las fuerzas de fricción lineales (sustentación) usualmente son muy pequeñas en comparación con las fuerzas de arrastre, generalmente se tiende a despreciarlas, lo cual queda descrito en la siguiente ecuación:

$$D(\nu) = -\text{diag}(\tau_{D_x} \tau_{D_y} \tau_{D_z} \tau_{D_\phi} \tau_{D_\theta} \tau_{D_\psi}) \quad (2.26)$$

Los elementos de esta matriz no son sencillos de calcular puesto que igualmente dependen de la geometría del vehículo y de su velocidad. En la ecuación (2.27) se ilustra una forma de como calcular estos coeficientes (ver [28])

$$\tau_{D_i} = -12 \frac{A_i \mu u_i}{d_i} - \frac{1}{2} C_{D_i} A \rho u_i |u_i| \quad (2.27)$$

donde:

- ◇ u_i es la velocidad incidente en la dirección del eje $i = x, y, z, \phi, \theta, \psi$.
- ◇ A_i define el area de sección transversal.
- ◇ d_i representa la dimensión característica perpendicular a u_i .
- ◇ C_{D_i} denota el coeficiente dependiente del número de Reynolds.
- ◇ μ es la viscosidad dinámica del fluido.

El primer termino en la ecuación (2.27) corresponde al flujo laminar mientras que el segundo termino corresponde al flujo turbulento, ver [28].

2.4.4. Fuerzas y momentos de restitución

Cuando un cuerpo se sumerge en un fluido bajo el efecto de la gravedad surge una fuerza que contrarresta el efecto de esta, dicha fuerza se denomina flotabilidad o “*buoyancy*”.

Definiendo el vector de aceleración de gravedad “ a ” como:

$$a_g^{\mathcal{I}} = 9.81m/s^2 \quad (2.28)$$

Podemos definir el peso del cuerpo como: $W = ma_g^{\mathcal{I}}$; de igual manera la flotabilidad puede expresarse como: $B = \rho a_g^{\mathcal{I}} \nabla$; donde, ρ es la densidad del agua, ∇ es el volumen de agua desplazado por el vehículo, m describe la masa del vehículo y $a_g^{\mathcal{I}}$ representa la aceleración gravitacional. Definiendo el vector de fuerza generado por la aceleración de la gravedad en el marco inercial, se tiene.

$$f_a^{\mathcal{I}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

De igual forma, el vector de flotabilidad se expresa como:

$$f_B^{\mathcal{I}} = - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Se analizará en los párrafos siguientes como la fuerza de gravedad actúa directamente en el centro de gravedad y como la fuerza de flotabilidad actúa en el centro de flotabilidad, esto es con el objetivo de definir un modelo completo de la interacción de estas fuerzas en el vehículo, ver Fig. 2.3.

Se considera que el origen del marco del cuerpo $O^{\mathcal{B}}$ coincide con el centro de masa C_M y el centro de flotabilidad C_B es colineal a lo largo del eje z_B , entonces el centro de masa y flotabilidad pueden definirse como:

$$C_B^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -z_b \end{pmatrix}^T \quad C_M^{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$$

Aplicando la matriz de transformación $R^{\mathcal{I} \rightarrow \mathcal{B}}$, la fuerza de peso y flotabilidad pueden ser representadas en el marco del cuerpo como:

$$f_g^{\mathcal{B}} = R^{\mathcal{I} \rightarrow \mathcal{B}} f_a^{\mathcal{I}} \quad (2.31)$$

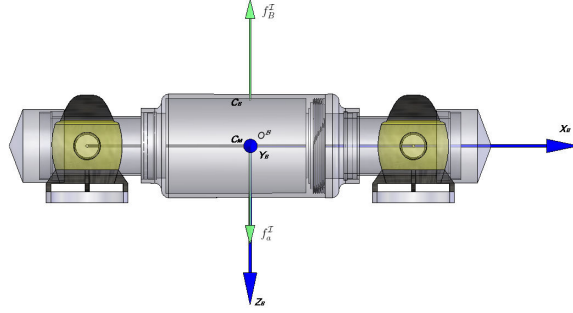


Figura 2.3: Relación peso-flotabilidad

$$f_B^B = R^{I \rightarrow B} f_B^I \quad (2.32)$$

Por lo tanto, el vector de gravedad y flotabilidad se puede formar de la siguiente manera:

$$g(\eta) = - \begin{pmatrix} f_g^B + f_B^B \\ C_M^B \times f_g^B + C_B^B \times f_B^B \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Realizando algunas operaciones algebraicas, el vector final de gravedad puede ser representado por la siguiente ecuación:

$$g^B = - \begin{pmatrix} (B - W) \sin \theta \\ (W - B) \cos \theta \sin \phi \\ (W - B) \cos \theta \cos \phi \\ (Br_{B_z} - Wr_{M_z}) \cos \theta \sin \phi \\ (Br_{B_z} - Wr_{M_z}) \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Para simplificar la complejidad de la dinámica del vehículo se asume que la flotabilidad y el peso se encuentran en equilibrio, es decir, $W = B$. Entonces la distancia al centro de gravedad y el centro de flotabilidad se define por:

$$BG = \left(\overline{BG}_x \quad \overline{BG}_y \quad \overline{BG}_z \right)^T = \left(r_{B_x} - r_{M_x} \quad r_{B_y} - r_{M_y} \quad r_{B_z} - r_{M_z} \right)^T \quad (2.35)$$

si $r_{B_x} = r_{M_x}$ y $r_{B_y} = r_{M_y}$ entonces el vector de flotabilidad y de gravedad quedan definidos por la siguiente ecuación:

$$g(\eta) = - \left(0 \quad 0 \quad 0 \quad \overline{BG}_z W \cos \theta \sin \phi \quad \overline{BG}_z W \sin \theta \quad 0 \right)^T \quad (2.36)$$

2.5. Ecuaciones de movimiento en \mathcal{I}

En la sección 2.4 se mostró que las ecuaciones de movimiento de un vehículo submarino pueden ser descritas en el cuerpo por:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + w \quad (2.37)$$

donde

$$M = M_{RB} + M_A \quad C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu) \quad (2.38)$$

$$D(\nu) = D_P(\nu) + D_S(\nu) + D_W(\nu) + D_M(\nu) \quad (2.39)$$

Ahora bien si queremos representar esta misma dinámica en el marco inercial \mathcal{I} bastará con aplicarle las siguientes transformaciones (asumiendo que $J(\eta)$ es no singular):

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad \Leftrightarrow \nu = J^{-1}(\eta)\dot{\eta} \quad (2.40)$$

$$\ddot{\eta} = J(\eta)\dot{\nu} + \dot{J}(\eta)\nu \quad \Leftrightarrow \dot{\nu} = J^{-1}(\eta)[\ddot{\eta} - \dot{J}(\eta)J^{-1}(\eta)\dot{\eta}] \quad (2.41)$$

para eliminar ν y $\dot{\nu}$ de la ecuación (2.37) definimos:

$$\begin{aligned} M_\eta(\eta) &= J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta) \\ C_\eta(\nu, \eta) &= J^{-1}(\eta)[C(\nu) - J^{-1}(\eta)\dot{J}(\eta)]J^{-1}(\eta) \\ D_\eta(\nu, \eta) &= J^{-1}(\eta)D(\eta)J^{-1}(\eta) \\ g_\eta(\eta) &= J^{-T}(\eta)g(\eta) \\ \tau_\eta(\eta) &= J^{-T}(\eta)\tau \end{aligned} \quad (2.42)$$

Esto nos lleva a la siguiente representación vectorial en el marco inercial.

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = \tau_\eta \quad (2.43)$$

2.6. Descripción del vehículo $4 - T^2$

Este vehículo consta de 4 propulsores (motores externos) y 4 servomotores internos los cuales sirven para hacer rotar los propulsores externos, con esta configuración se logra

que 5 de los 6 GDL sean actuados. A continuación se describen las fuerzas que generan los 4 propulsores en forma vectorial que serán utilizadas en las siguientes secciones.

$$f_i^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -f_i \end{pmatrix} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.44)$$

Debido a que el vehículo posee un fuselaje que se asemeja a una estructura tubular, se puede considerar que los parámetros de masa agregada pueden ser obtenidos con las siguientes ecuaciones, ver [24].

$$X_{\dot{u}} = -0.1\bar{m} \quad (2.45)$$

$$Y_{\dot{v}} = -\pi\rho\bar{r}^2\bar{L} \quad (2.46)$$

$$Z_{\dot{w}} = -\pi\rho\bar{r}^2\bar{L} \quad (2.47)$$

$$K_{\dot{p}} = 0 \quad (2.48)$$

$$M_{\dot{q}} = -\frac{1}{12}\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}^3 \quad (2.49)$$

$$N_{\dot{r}} = -\frac{1}{12}\pi\rho\bar{r}^2\bar{L}^3 \quad (2.50)$$

donde \bar{m} representa la masa del vehículo, \bar{L} la longitud, considerando al vehículo como un cilindro r es el radio y ρ es la densidad del agua ($1000Kg/m^3$).

Los elementos que integran la diagonal principal de la matriz (2.21) se consideran difíciles de calcular ya que dependen de la geometría del cuerpo.

Recordar que M_{RB} es la matriz que define la distribución de masa y la inercia del vehículo por ser un cuerpo rígido y es descrita por la siguiente matriz:

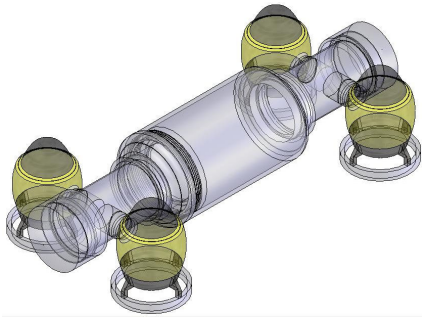
$$M_{RB} = \begin{pmatrix} mI_{3x3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_0 \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

$$M_{RB} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m_{z_G} & -m_{y_G} \\ 0 & m & 0 & -m_{z_G} & 0 & m_{x_G} \\ 0 & 0 & m & m_{y_G} & -m_{x_G} & 0 \\ 0 & -m_{z_G} & m_{y_G} & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ m_{z_G} & 0 & -m_{x_G} & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -m_{y_G} & m_{x_G} & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

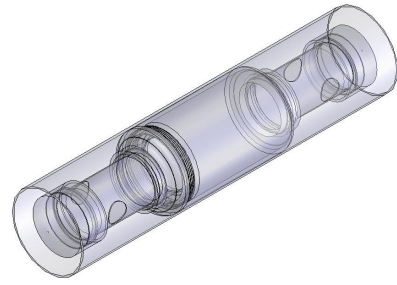
En la Figura 2.4 se puede ver que la manera más sencilla de obtener los elementos que conforman esta matriz es aproximando la geometría del vehículo a la de un cilindro, por esta razón se utilizarán las ecuaciones que modelan la inercia de un cilindro mismas que a continuación se describen:

$$I_x = \frac{1}{2}mr^2 \quad (2.53)$$

$$I_y = I_z = \frac{1}{12}m(3a^2 + L^2) \quad (2.54)$$



(a) Vehículo



(b) Aproximación a forma cilíndrica

Figura 2.4: Simplificación del vehículo para la obtención de momentos de inercia

Como en el caso de la matriz M_A el vehículo al poseer 3 planos de simetría se pueden despreciar los términos fuera de la diagonal principal, como lo describe la siguiente ecuación:

$$M_{RB} = \text{diag}\{m, m, m, I_x, I_y, I_z\} \quad (2.55)$$

Lo cual dará como resultado la siguiente matriz

$$M_{RB} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \quad (2.56)$$

2.6.1. Movimiento traslacional

El movimiento traslacional del vehículo se puede realizar sobre los 3 ejes de traslación (x_B, y_B, z_B) , pero sólo en 2 de estos ejes el movimiento es actuado; estos ejes son x_B y z_B . Si se lleva a cabo una rotación debida a los propulsores en torno al eje y_B se obtendrá movimiento en x o en z y este dependerá de la combinación de los ángulos α y γ , ver Fig. 2.5. Para lograr el movimiento en el sentido del eje y_B es necesario hacer un pequeño giro alrededor del eje x_B y mantener este giro con ángulo constante, debido a esta condición el movimiento se considera subactuado.

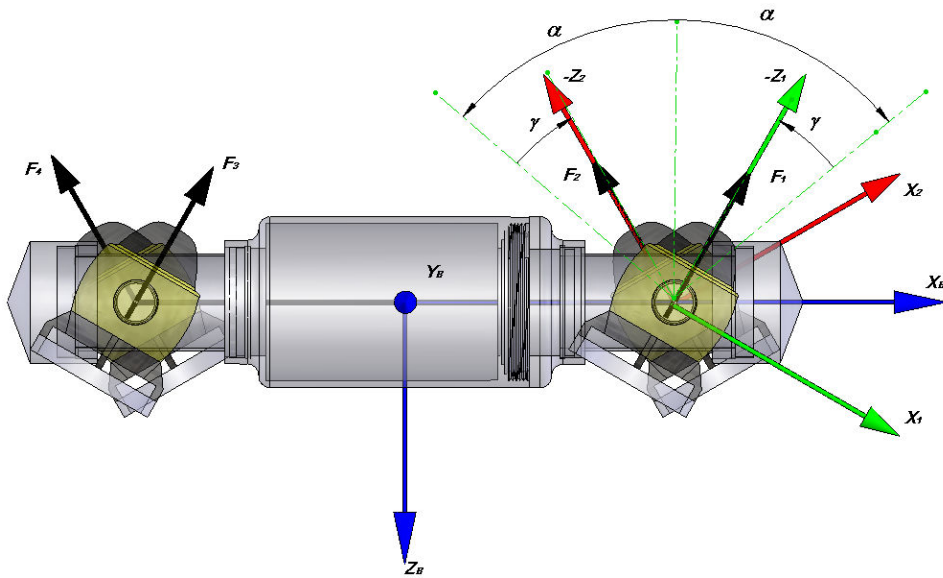


Figura 2.5: Combinación para traslación rotación

2.6.1.1. Traslación en x

Es el movimiento traslacional en la dirección del eje x_B (*surge*) está controlado por la rotación de los propulsores paralelos al eje y_B , esto es, cuando los propulsores roten con ángulo α negativo (dirección hacia adelante) se obtendrá como resultado un avance positivo sobre x_B , ver Fig. 2.11a. En caso de que la rotación del propulsor ocurra con ángulo positivo (dirección hacia atrás), el avance del vehículo será negativo, ver Fig. 2.11b.

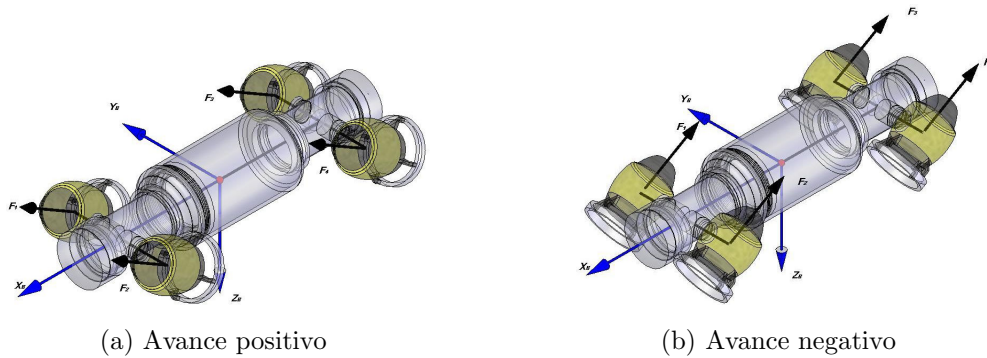


Figura 2.6: Traslación a lo largo del eje x

2.6.1.2. Traslación en y

El movimiento a lo largo del eje y_B debido a la configuración del vehículo, este desplazamiento se realizará cuando exista una rotación alrededor del eje x_B (*alabeo*). Este giro debe ser constante y controlando la fuerza de los propulsores de otra manera el resultado sería un giro completo en torno al eje x_B del vehículo, ver Fig. 2.7.

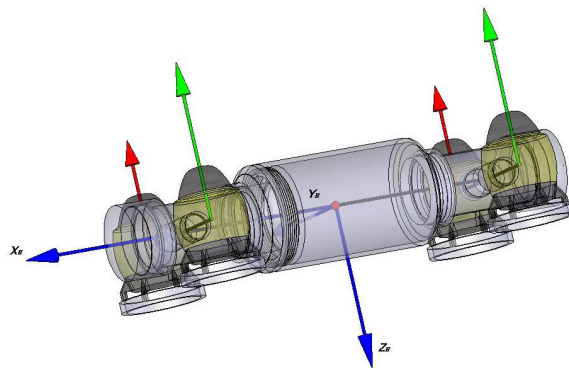


Figura 2.7: Traslación a lo largo del eje y

2.6.1.3. Traslación en z

La traslación en el eje z_B es la más sencilla ya que si la suma de ángulos α y γ es cero (ver Fig. 2.5), entonces con incrementar o decrementar la velocidad de los propulsores será suficiente para controlar el avance sobre este eje, ver Fig. 2.8.

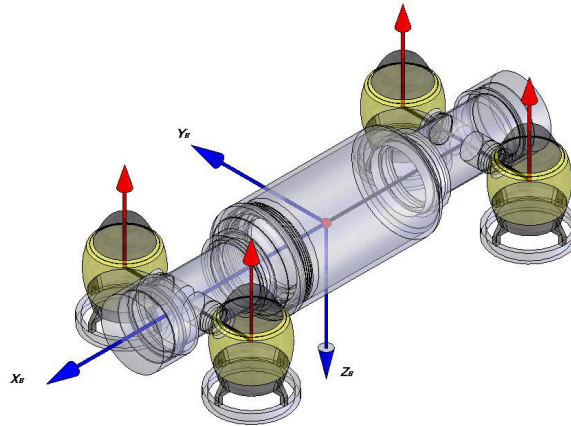


Figura 2.8: Traslación a lo largo del eje z

2.6.2. Movimiento rotacional

El movimiento rotacional es definido como los movimientos alrededor de los ejes (x_B, y_B, z_B) para generar los ángulos de Euler: ϕ (alabeo), θ (cabeceo) y ψ (guiñada). Estos movimientos estarán dados por la diferencia de velocidad de los propulsores situados en los extremos del submarino. A continuación se describe de manera breve cada una de estas rotaciones.

2.6.2.1. *Roll* (ϕ)

Para generar una rotación alrededor del eje x_B será necesario aumentar/reducir la velocidad del par de propulsores que se encuentran en uno de los extremos laterales del vehículo y reducir/aumentar la velocidad del par de propulsores opuesto, ver Fig. 2.9.

2.6.2.2. *Pitch* (θ)

Para generar una rotación alrededor del eje y_B será necesario aumentar/reducir la velocidad del par de propulsores que se encuentran en la parte trasera del vehículo y

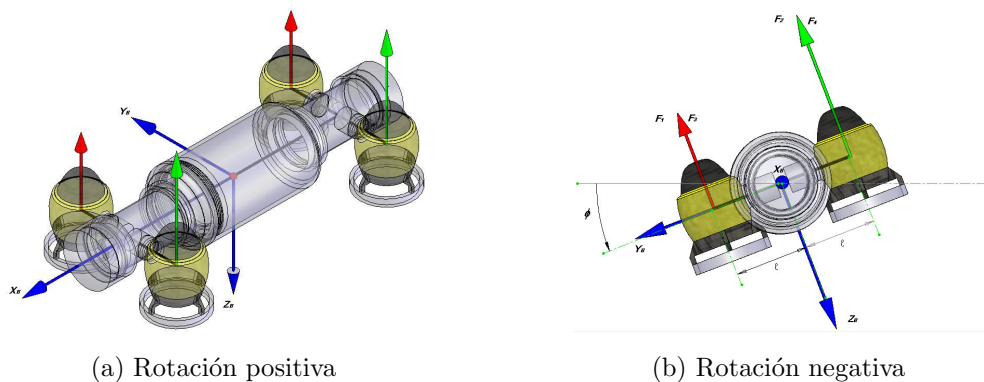


Figura 2.9: Rotación alrededor del eje x (*Roll*)

reducir/aumentar la velocidad del par de propulsores que se encuentran en la parte frontal y trasera del vehículo, ver Fig. 2.10.

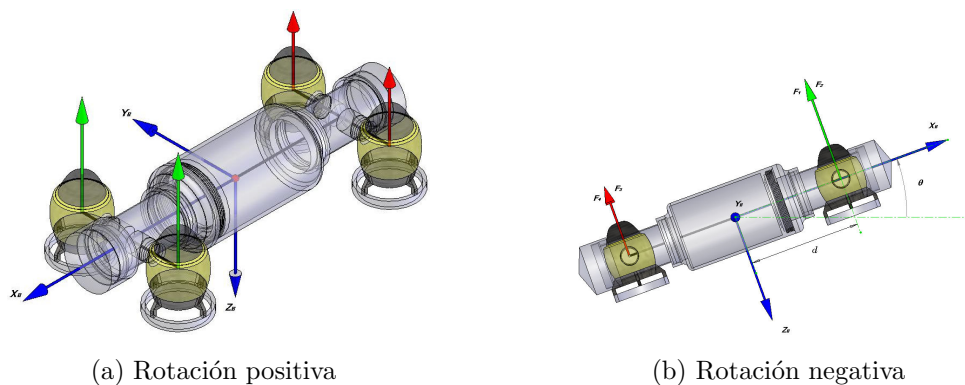
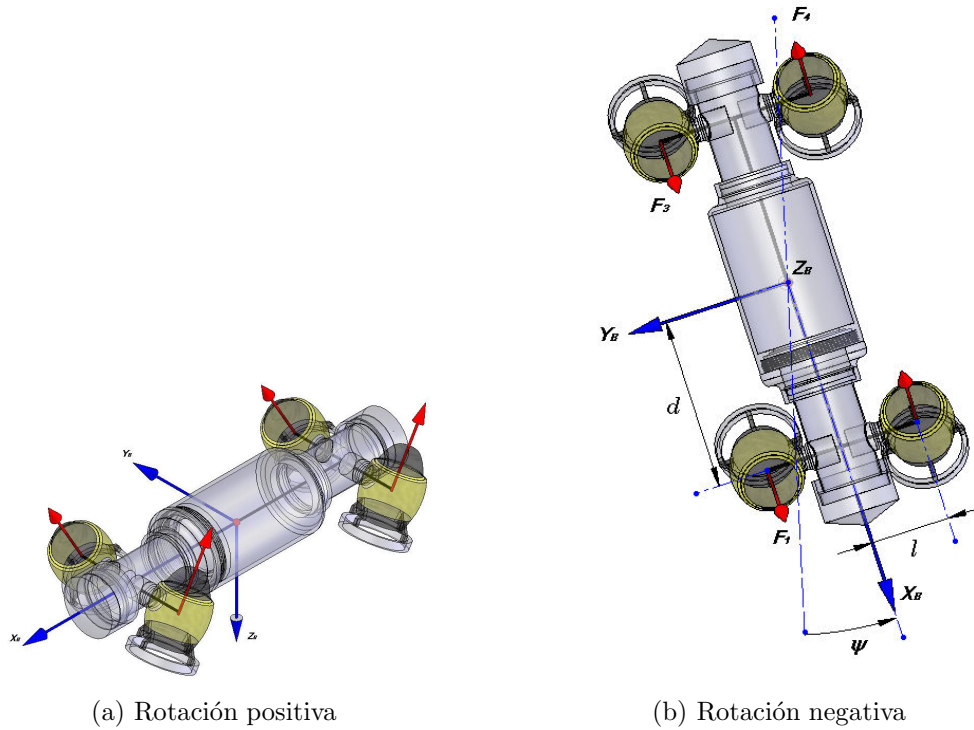


Figura 2.10: Rotación alrededor del eje y (*Pitch*)

2.6.2.3. *Yaw* (ψ)

Para generar una rotación alrededor del eje z_B será necesario rotar los propulsores laterales un ángulo γ , los laterales opuestos un ángulo $-\gamma$ y además la fuerza de propulsión debe ser la misma para los 4 propulsores, ver Fig. 2.11.

Figura 2.11: Rotación alrededor del eje z (*Yaw*)

2.6.3. Fuerzas y momentos de los actuadores

Las fuerzas de traslación y rotación del vehículo pueden ser expresados por la siguiente ecuación:

$$\tau^B = \begin{pmatrix} T^{1 \rightarrow B} + T^{2 \rightarrow B} + T^{3 \rightarrow B} + T^{4 \rightarrow B} \\ \ell_1^B \times T^{1 \rightarrow B} + \ell_2^B \times T^{2 \rightarrow B} + \ell_3^B \times T^{3 \rightarrow B} + \ell_4^B \times T^{4 \rightarrow B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_1^B \\ \tau_2^B \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

donde la primera fila de la ecuación (2.57) representa las fuerzas que intervienen en el desplazamiento traslacional, mientras que la segunda fila define los pares que generan el movimiento rotacional del vehículo. En las secciones siguientes se desarrollará paso a paso la obtención de la ecuación (2.57).

2.6.3.1. Fuerzas de traslación

El movimiento traslacional del vehículo es producto de la combinación del pivoteo de los motores internos y la fuerza producida por los propulsores. Los vectores de transformación $T^{1 \rightarrow B}, T^{2 \rightarrow B}, T^{3 \rightarrow B}, T^{4 \rightarrow B}$ que llevan del marco de pivoteo hacia el cuerpo del

vehículo para cada uno de los motores son descritos como,

$$T^{i \rightarrow B} = R_\alpha R_\gamma f_i^t \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.58)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.44) en (2.58) se obtiene:

$$T^{1 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} f_1 \sin(\alpha + \gamma) \\ 0 \\ -f_1 \cos(\alpha + \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

$$T^{2 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} f_2 \sin(\alpha - \gamma) \\ 0 \\ -f_2 \cos(\alpha - \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.60)$$

$$T^{3 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} f_3 \sin(\alpha + \gamma) \\ 0 \\ -f_3 \cos(\alpha + \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

$$T^{4 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} f_4 \sin(\alpha - \gamma) \\ 0 \\ -f_4 \cos(\alpha - \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.62)$$

Por lo tanto, sumando estas cuatro matrices se obtendrá la ecuación que describe las fuerzas de traslación debido al pivoteo de los cuatro motores. Esta es expresada como,

$$\begin{aligned} \tau_1^B = & \begin{pmatrix} (\sin(\alpha + \gamma))(f_1 + f_3) \\ 0 \\ -(\cos(\alpha + \gamma))(f_1 + f_3) \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} (\sin(\alpha - \gamma))(f_2 + f_4) \\ 0 \\ -(\cos(\alpha - \gamma))(f_2 + f_4) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$\tau_1^B = \begin{pmatrix} (\sin(\alpha - \gamma))(f_2 + f_4) + (\sin(\alpha + \gamma))(f_1 + f_3) \\ 0 \\ -(\cos(\alpha - \gamma))(f_2 + f_4) - (\cos(\alpha + \gamma))(f_1 + f_3) \end{pmatrix} \quad (2.64)$$

2.6.3.1.1. Análisis de fuerzas en x . De la ecuación (2.64) se observa que si el ángulo $\gamma = 0$ entonces el desplazamiento sobre el eje x (*surge*) dependerá totalmente del ángulo α . De esta manera la ecuación que representa lo anterior es (ver Figura 2.5).

$$\tau_x^B = \sin \alpha \sum_{i=1}^4 f_i \quad (2.65)$$

2.6.3.1.2. Análisis de fuerzas en y . De la ecuación (2.64) se observa que las fuerzas sobre y es 0. Como ya se mencionó antes este movimiento se producirá controlando la fuerza de propulsión y manteniendo constante la desviación del ángulo ϕ .

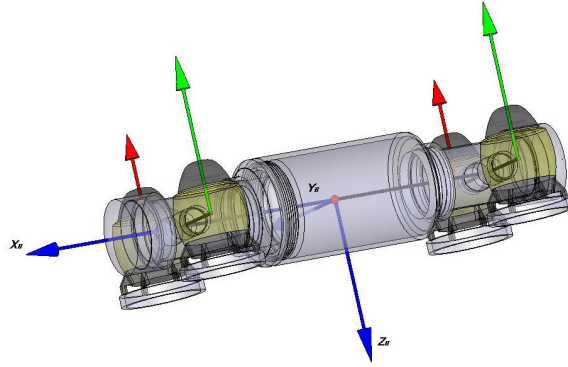


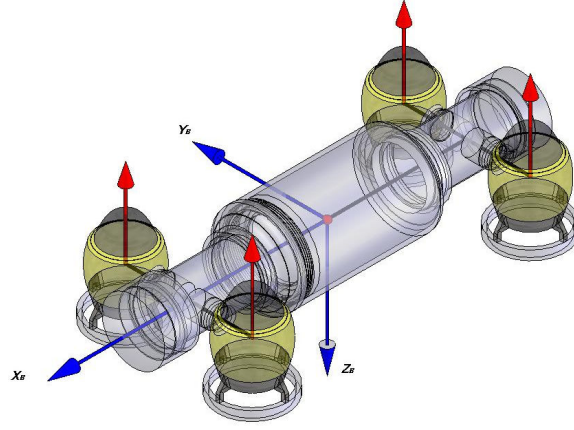
Figura 2.12: Traslación sobre el eje y

2.6.3.1.3. Análisis de fuerzas en z . De la ecuación (2.64) se observa que si los ángulos γ y α son igual a cero, entonces el desplazamiento sobre el eje z (*heave*) dependerá totalmente de las fuerzas producidas por los propulsores, esto se representa como (ver Figura 2.13)

$$\tau_z^B = \sum_{i=1}^4 f_i \quad (2.66)$$

2.6.3.2. Momentos ϕ , θ y ψ

Para obtener todos los momentos (alabeo (ϕ), cabeceo (θ) y guiñada (ψ)) considerando el pivoteo de los propulsores en torno al eje y_B se debe conocer la distancia del centro geométrico del vehículo hacia el punto de aplicación de la fuerza de cada propulsor. De esta forma se puede definir,

Figura 2.13: Traslación sobre el eje z

$$\ell_1^B = (d \ \ell \ 0)^T \quad (2.67)$$

$$\ell_2^B = (d \ -\ell \ 0)^T \quad (2.68)$$

$$\ell_3^B = (-d \ \ell \ 0)^T \quad (2.69)$$

$$\ell_4^B = (-d \ -\ell \ 0)^T \quad (2.70)$$

donde ℓ es la distancia medida desde el centro de gravedad al centro de los propulsores a lo largo del eje x y d representa la distancia medida desde el centro de gravedad hasta el centro de los propulsores medido a lo largo del eje y . Reescribiendo la segunda fila de la ecuación (2.57) se tiene que,

$$\ell_1^B \times T^{1 \rightarrow B} + \ell_2^B \times T^{2 \rightarrow B} + \ell_3^B \times T^{3 \rightarrow B} + \ell_4^B \times T^{4 \rightarrow B}. \quad (2.71)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.59), (2.60), (2.61), (2.62), (2.67), (2.68), (2.69) y (2.70) en la ecuación (2.71) obtenemos:

$$\ell_1^B \times T^{1 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} d \\ \ell \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_1 \sin(\alpha + \gamma) \\ 0 \\ -f_1 \cos(\alpha + \gamma) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\ell f_1 \cos(\alpha + \gamma) \\ d f_1 \cos(\alpha + \gamma) \\ -\ell f_1 \sin(\alpha + \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.72)$$

$$\ell_2^B \times T^{2 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} d \\ -\ell \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_2 \sin(\alpha - \gamma) \\ 0 \\ -f_2 \cos(\alpha - \gamma) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell f_2 \cos(\alpha - \gamma) \\ df_2 \cos(\alpha - \gamma) \\ \ell f_2 \sin(\alpha - \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.73)$$

$$\ell_3^B \times T^{3 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} -d \\ \ell \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_3 \sin(\alpha + \gamma) \\ 0 \\ -f_3 \cos(\alpha + \gamma) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\ell f_3 \cos(\alpha + \gamma) \\ -df_3 \cos(\alpha + \gamma) \\ -\ell f_3 \sin(\alpha + \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.74)$$

$$\ell_4^B \times T^{4 \rightarrow B} = \begin{pmatrix} -d \\ -\ell \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} f_4 \sin(\alpha - \gamma) \\ 0 \\ -f_4 \cos(\alpha - \gamma) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell f_4 \cos(\alpha - \gamma) \\ -df_4 \cos(\alpha - \gamma) \\ \ell f_4 \sin(\alpha - \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.75)$$

Realizando la suma de las ecuaciones anteriores se puede calcular la ecuación que representa los torques aplicados en el vehículo. De esta manera se obtiene:

$$\tau_2^B = \begin{pmatrix} \ell f_2 \cos(\alpha - \gamma) - \ell f_3 \cos(\alpha + \gamma) - \ell f_1 \cos(\alpha + \gamma) + \ell f_4 \cos(\alpha - \gamma) \\ df_1 \cos(\alpha + \gamma) - df_3 \cos(\alpha + \gamma) + df_2 \cos(\alpha - \gamma) - df_4 \cos(\alpha - \gamma) \\ \ell f_2 \sin(\alpha - \gamma) - \ell f_3 \sin(\alpha + \gamma) - \ell f_1 \sin(\alpha + \gamma) + \ell f_4 \sin(\alpha - \gamma) \end{pmatrix} \quad (2.76)$$

2.6.3.2.1. Momentos alrededor de x_B , τ_ϕ Generar un movimiento en torno al eje x_B se logra mediante la diferencia de velocidades de los propulsores laterales contra los del otro costado, ver Fig. 2.14. De la ecuación (2.76) tomando el elemento de la primera fila y asumiendo que el producto de la suma de los ángulos α y γ es igual a cero, se obtiene la ecuación que modela el momento alrededor del eje x_B , el cual es descrito como,

$$\tau_\phi^B = \ell((f_2 + f_4) - (f_1 + f_3)) \quad (2.77)$$

2.6.3.2.2. Momentos alrededor de y_B , τ_θ Generar un movimiento en torno al eje y_B se realiza mediante la diferencia de velocidades de los propulsores frontales contra los situados en la parte trasera, ver Fig. 2.15. De la ecuación (2.76) tomando el elemento de la segunda fila y asumiendo que el producto de la suma de los ángulos α y γ es igual a cero, la ecuación que expresa el momento alrededor del eje y_B es:

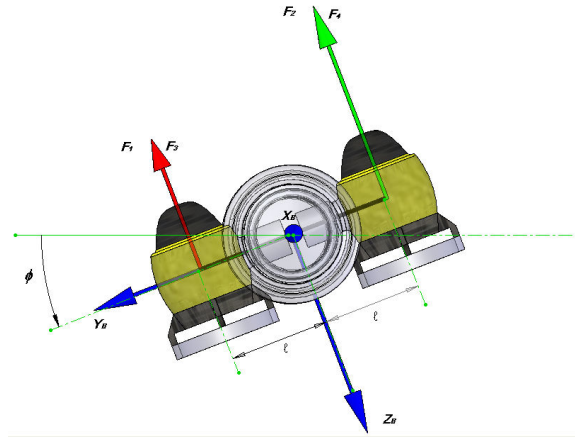


Figura 2.14: Par generado alrededor de x , τ_ϕ

$$\tau_\theta^B = d((f_1 + f_2) - (f_3 + f_4)) \quad (2.78)$$

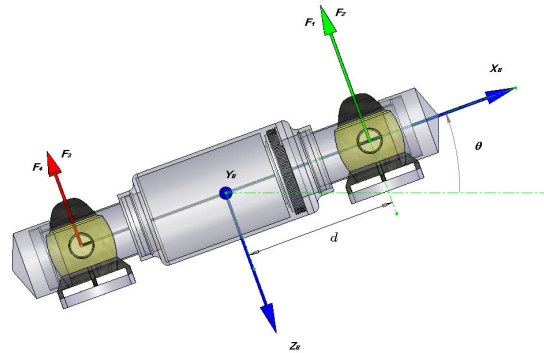


Figura 2.15: Par generado alrededor de y , τ_θ

2.6.3.2.3. Momentos alrededor de z , τ_ψ Para generar un movimiento en torno al eje z_B se logra mediante el pivoteo de los propulsores, esto es, que el producto de la suma de los ángulos α y $\gamma \neq 0$, además que la fuerza de cada propulsor debe ser igual que los otros 3, ver Fig. 2.16. De la ecuación (2.76) tomando el elemento de la tercer fila se obtiene la ecuación que define el momento alrededor del eje z_B siendo este:

$$\tau_\psi^B = -l \sin(\gamma) \sum_i^4 f_i \quad (2.79)$$

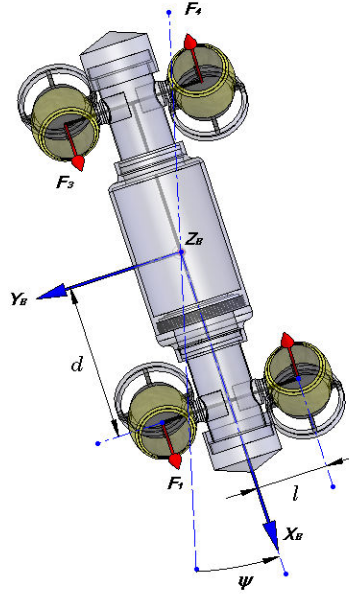


Figura 2.16: Par generado alrededor de z , τ_ψ

2.7. Descripción del vehículo OME y CHAAK

Los vehículos *OME* y *CHAAK* son vehículos que cuentan con características similares: ambos poseen 3 thrusters. Los propulsores laterales derecho e izquierdo producen las fuerzas f_1 y f_2 , mientras que el propulsor inferior produce la fuerza f_3 . Los vehículos difieren en peso y estructura principal; **OME** es más parecido a un *ROV* por su aspecto cuadrado (gran caja), por otro lado **CHAAK** es más similar a un submarino por su fuselaje cilíndrico, ver Figura 2.17.

El vehículo $4 - T^2$ es un prototipo el cual resulta difícil de controlar debido al acoplamiento de sus dinámicas y al pivoteo de sus propulsores. De igual forma la distancia entre \mathcal{C}_B y \mathcal{C}_I es tan corta que dificulta la tarea de sintonizar el lazo de control para estabilidad en orientación, por consecuencia es relativamente fácil de perturbar y sacarlo del punto de estabilidad. Esta experiencia obtenida a partir del primer prototipo desarrollado, nos permitió mejorar los prototipos subsecuentes, de esta forma se procedió a que el vector de restitución (g) fuera un factor que ayudara a estabilizar los vehículos. Es así, que con **OME** y **CHAAK** los ángulos de *roll* (ϕ) y *pitch* (θ) son estabilizados hidrostáticamente por diseño, ya que la distancia entre \mathcal{C}_B y \mathcal{C}_I es lo suficientemente grande para garanti-

zar la condición de estabilidad en dos planos. Como resultado, los dos vehículos poseen solamente 4 GDL (x , y , z y ψ).

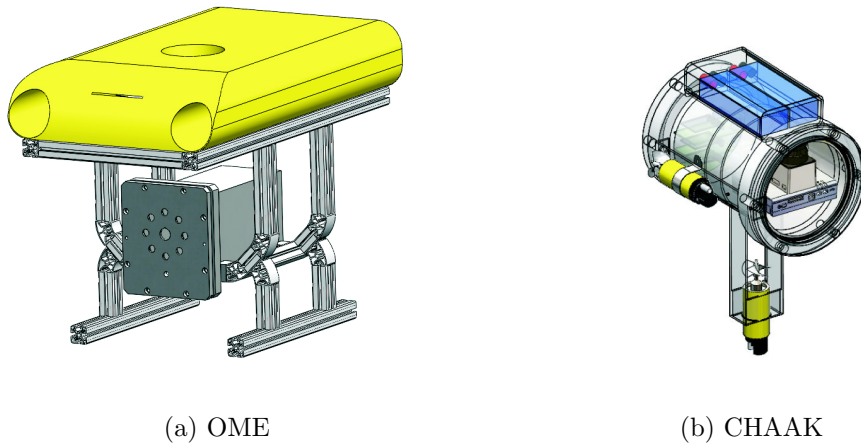


Figura 2.17: Imagen CAD de **OME** y **CHAAK**

En esta sección describiremos las fuerzas que producen el desplazamiento y rotación en este tipo de vehículos. Cabe recordar que aunque sus momentos de inercia, peso, masa agregada y fuselaje son distintos, matemáticamente su dinámica puede ser descrita de forma similar.

2.7.1. Movimiento traslacional

Notar que debido a la configuración del vehículo, los desplazamientos en el eje x_B y z_B son completamente actuados. Por otro lado, el movimiento en el eje y_B es subactuado, es decir para generar un desplazamiento en y_B será necesario hacer un cambio de rumbo ψ . En las siguientes secciones se describirán más en detalle estos, así mismo se presentará su representación matemática.

2.7.1.1. Traslación en x

El movimiento traslacional a lo largo del eje x_B (*surge*) se logrará cuando ambos propulsores laterales impulsen el vehículo con la misma fuerza, cabe mencionar que las hélices del vehículo son de paso positivo, es decir que si giran en sentido de las manecillas del reloj impulsarán el vehículo. En caso de que la rotación de la hélice del propulsor

ocurra en sentido inverso, el vehículo retrocederá (dirección hacia atrás, *surge* negativo), ver Fig. 2.18.

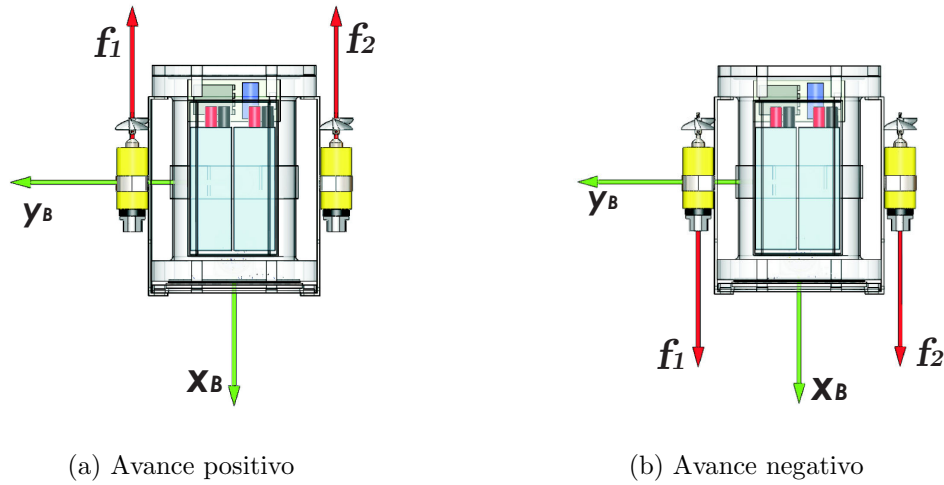


Figura 2.18: Traslación a lo largo del eje x

La ecuación que describe matemáticamente este movimiento está expresado por la siguiente ecuación,

$$\tau_x = \sum_{i=1}^2 f_i \quad (2.80)$$

2.7.1.2. Traslación en y

Para generar un desplazamiento a lo largo del eje y_B debido a la configuración del vehículo, será necesario hacer un cambio de rumbo ψ , tal que si este cambio es de $\frac{\pi}{2}$ con respecto al rumbo anterior estaremos en presencia de un desplazamiento total sobre y_B , de otra manera el desplazamiento estará realizándose de manera acoplada en el plano xy , ver Fig. 2.19.

Este movimiento queda descrito por la siguiente ecuación

$$\tau_y = \sin(\psi) \sum_{i=1}^2 f_i \quad (2.81)$$

2.7.1.3. Traslación en z

La traslación en el eje z_B es la más sencilla ya que esta dinámica está completamente actuada por el propulsor f_3 , entonces la fuerza que emplee este propulsor (incre-

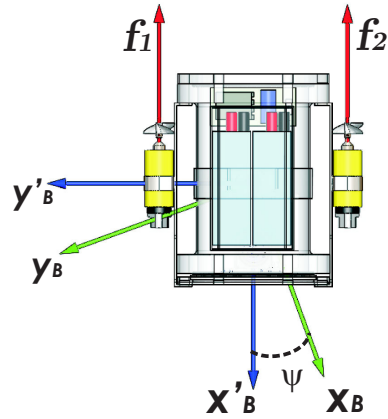


Figura 2.19: Traslación a lo largo del eje y

mentar/decrementar la velocidad de rotación de la hélice) será suficiente para desplazar/posicionar el vehículo a la profundidad deseada, ver Fig. 2.20. Matemáticamente la

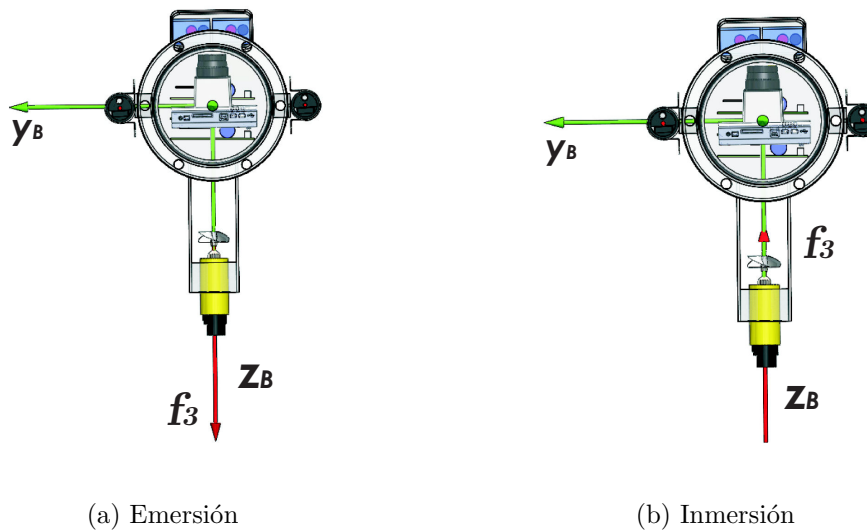


Figura 2.20: Traslación a lo largo del eje z

ecuación que representa este movimiento es la mas simple de todas, esta es:

$$\tau_z = f_3 \quad (2.82)$$

2.7.2. Movimiento rotacional

Debido a la configuración de los propulsores y diseño de estos vehículos se tiene que el vehiculo esta estabilizado en *pitch* y *roll*. De esta manera, el unico movimiento rotacional

a controlar será la rotación en torno al eje z . La velocidad de rotación estará controlada directamente por la velocidad de rotación de las hélices.

2.7.2.1. *Yaw* (ψ)

Para generar una rotación alrededor del eje z_B será suficiente con hacer que uno de los propulsores laterales aumente la propulsión y el otro la disminuya, si $f_1 > f_2$ entonces el vehículo experimentará una rotación positiva en caso de que $f_2 > f_1$ la rotación será negativa, ver Fig. 2.21.

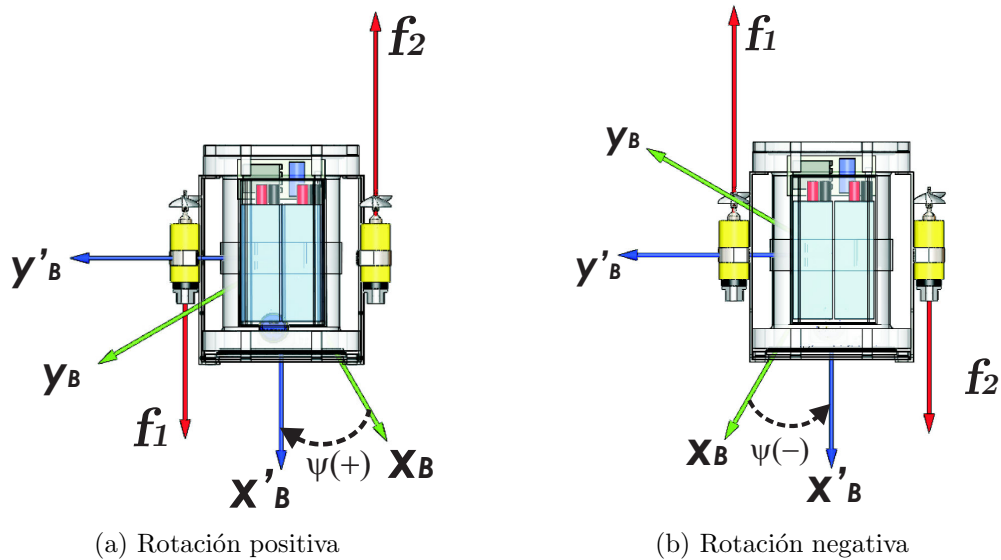


Figura 2.21: Rotación alrededor del eje z (*Yaw*)

La ecuación que describe la rotación en torno al eje z es

$$\tau_\psi = l(f_1 - f_2) \quad (2.83)$$

2.8. Modelos utilizados para control

En las secciones previas se detallaron las características generales que componen la descripción matemática de un AUV, en esta sección abordaremos los casos particulares y simplificación del modelo general para poder usarlos en capítulos posteriores.

2.8.1. Modelo para análisis de intervalos

Se considera que el vehículo CHAAK (ver Fig. 5.19) debido a su fuselaje tubular posee 3 planos de simetría, este prototipo fue diseñado para navegar a velocidad baja razón por la cual la masa agregada y las fuerzas de arrastres no serán consideradas en el modelo a utilizar para el análisis de intervalos. También, se sabe por diseño que la distancia entre su C_B y C_W es lo suficientemente grande como para mantener el ángulo de *pitch* y *roll* estable. Finalmente, debido a la posición de los propulsores los planos de control están desacoplados, esto es, tiene un plano de inmersión (u, w, q) y un plano de navegación horizontal (u, v, r) , ver [2], [52]. De esta manera una forma apropiada para describir la cinemática del vehículo en el plano de navegación horizontal (plano de rumbo) es la representada por la siguiente ecuación,

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi + v_{c_x}, \quad (2.84a)$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi + v_{c_y}, \quad (2.84b)$$

$$\dot{\psi} = r. \quad (2.84c)$$

donde u representa la velocidad hacia adelante, v describe la velocidad de desplazamiento lateral, ψ denota la orientación del vehículo y r describe la velocidad angular en coordenadas del cuerpo \mathbf{B} , x y y representan las coordenadas cartesianas del centro de masa, v_{c_x} y v_{c_y} definen la velocidad de la corriente submarina, ver[35].

El modelo matemático descrito por la ecuación (4.10) que se utilizará para estimar la posición del vehículo haciendo uso del análisis de intervalos, considera que el vehículo se mueve a baja velocidad por lo tanto las corrientes submarinas pueden ser despreciadas, *i.e.*, $v_{c_x}, v_{c_y} \approx 0$. De esta manera será necesario reescribir la ecuación (4.10) la cual está expresada en componentes de la velocidad en cada eje, para nuestros propósitos, la velocidad estará dada por una componente resultante de la suma de la velocidad de impulso generada por cada propulsor es decir $\nu = \nu_1 + \nu_2$ tal que si $\nu_1 = \nu_2$ la suma hará que el vehículo tenga velocidad constante, si $\nu_1 < \nu_2$ o $\nu_1 > \nu_2$ el vehículo girará en torno a z ,

la ecuación que describirá la posición del vehículo es,

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + \nu_k \cos(\psi_k) T_s, \quad (2.85a)$$

$$\hat{y}_{k+1} = \hat{y}_k + \nu_k \sin(\psi_k) T_s. \quad (2.85b)$$

$$(2.85c)$$

donde $\hat{x}_{k+1}, \hat{y}_{k+1}$ describen la posición estimada del robot, ν_k representa la velocidad de crucero, ψ_k es el rumbo a cada instante k y T_s el tiempo de muestreo.

Análisis de Intervalos

En este capítulo abordaremos el problema de localización de un AUV en espacios confinados y desconocidos. En la literatura encontramos diversas estrategias de localización. Por ejemplo, A. Caiti en [17] hace uso de un algoritmo basado en pertenencia de conjuntos (*set-membership*) para resolver el problema de localización utilizando las señales acústicas provenientes de boyas en la superficie marina, en este problema se asume que las mediciones son afectadas por errores acotados. Enfoques clásicos como el filtro de Kalman también se han utilizado, A. Alcocer [1] hace uso de un sistema de 4 boyas en superficie en combinación con el modelo cinemático para resolver la localización del AUV. Nuestro estudio se basó principalmente en una técnica poco usual para la navegación de vehículos submarinos. Dicha técnica es conocida como Análisis de Intervalos y fue desarrollada por Ramón E. Moore en los años 60's (utilizada primero en su tesis doctoral en 1962 y después en su libro en 1966). El Análisis de Intervalos esta basada en métodos computacionales (métodos numéricos) que sirven para resolver ecuaciones diferenciales con características particulares como se verá en las siguientes secciones.

3.1. Preliminares

En teoría de conjuntos se dice que: A es subconjunto de B , $A \subseteq B$, si todo elemento de A es también elemento de B . La relación de contención \subseteq tiene las siguiente propiedades para conjuntos A , B y C .

1. $A \subseteq A$.
2. Si $A \subseteq B$ y $B \subseteq C$ entonces $A \subseteq C$.

3. $A \subseteq B$ y $B \subseteq A$ si y sólo si $A = B$.

Las propiedades 1, 2 y 3 expresan brevemente que la propiedad de contención es reflexiva, transitiva y antisimétrica, respectivamente.

Definición 3.1 Si A y B son conjuntos entonces, la unión de A y B es el conjunto

$$A \cup B \triangleq \{a \mid (a \in A) \vee (a \in B)\}. \quad (3.1)$$

La intersección de A y B es el conjunto

$$A \cap B \triangleq \{a \mid (a \in A) \wedge (a \in B)\}. \quad (3.2)$$

La diferencia de dos conjuntos A y B es

$$A \setminus B \triangleq \{a \in A \mid a \notin B\}. \quad (3.3)$$

El producto cartesiano entre el conjunto A y B es

$$A \times B \triangleq \{(a, b) \mid a \in A \text{ y } b \in B\}. \quad (3.4)$$

Si $C = A \times B$, entonces la proyección de un subconjunto C_1 de C en A (con respecto de B) se define como,

$$\text{proj}_A(C_1) \triangleq \{a \in A \mid \exists b \in B \text{ tal que } (a, b) \in C_1\} \quad (3.5)$$

La inclusión de A en B está definida como,

$$A \subset B \Leftrightarrow \forall a \in A, a \in B. \quad (3.6)$$

Y la desigualdad de A y B por,

$$A = B \Leftrightarrow A \subset B \text{ y } B \subset A. \quad (3.7)$$

3.1.1. Intervalos

Definición 3.2 Intervalo $[x]$. Es un subconjunto conectado y cerrado de \mathbb{R} . El conjunto de todos los intervalos de \mathbb{R} será denotado por $\mathbb{I}\mathbb{R}$.

Por ejemplo $[-5, -3]$, $[-1, 10]$, 2 , $]-\infty, \infty]$, \mathbb{R} y \emptyset , son considerados como intervalos, mientras $]5, 10[$, $[3, 2]$ y $[0, 1] \cup [2, 5]$ no lo son.

Cota inferior. La cota inferior de un intervalo $[x]$ está definido por,

$$x^- = \mathbf{lb}([x]) = \inf\{x \mid x \in [x]\}. \quad (3.8)$$

Cota Superior. La cota superior de un intervalo $[x]$ está descrito por,

$$x^+ = \mathbf{ub}([x]) = \sup\{x \mid x \in [x]\}. \quad (3.9)$$

Por convención,

$$\mathbf{ub}(\emptyset) = -\infty \text{ y } \mathbf{lb}(\emptyset) = +\infty \quad (3.10)$$

Ancho. El ancho de un intervalo $[x]$ se define como

$$\mathbf{w}([x]) = x^+ - x^-. \quad (3.11)$$

Punto Medio. El punto medio de un intervalo es denotado como

$$\mathbf{mid}([x]) = \frac{x^+ + x^-}{2} \quad (3.12)$$

Envoltura de un intervalo (asociado con un subconjunto \mathbb{A} de \mathbb{R}). Es el intervalo más pequeño que contiene \mathbb{A} y es denotado por $[\mathbb{A}]$. Por ejemplo,

$$[1, 2] \cup [4, 6] = [1, 6]$$

Unión de Intervalo. Para dos intervalos $[a]$ y $[b]$, el intervalo unión está definido por,

$$[a] \sqcup [b] = [[a] \cup [b]].$$

3.1.1.1. Operadores Binarios

Si $\diamond \in \{+, -, *, /, \max, \min\}$, con $*$ que define la multiplicación, y si $[a]$ y $[b]$ son dos intervalos, definiremos,

$$[a] \diamond [b] \triangleq [\{a \diamond b \mid a \in [a], b \in [b]\}].$$

Entonces,

$$\begin{aligned} [a^-, a^+] + [b^-, b^+] &= [x^- + b^-, x^+ + y^+] \\ [a^-, a^+] \cdot [b^-, b^+] &= [\min(a^-b^-, a^+b^-, a^-b^+, a^+b^+), \\ &= [\max(a^-b^-, a^+b^-, a^-b^+, a^+b^+)] \\ \max([a^-, a^+], [b^-, b^+]) &= [\max(a^-b^-), \max(a^+b^+)] \end{aligned}$$

Por ejemplo,

$$\begin{aligned} [-1, 3] + [2, 5] &= [1, 8], \\ [-1, 3] \cdot [2, 5] &= [-5, 15], \\ [-1, 3]/[2, 5] &= [-\frac{1}{2}, \frac{3}{2}], \\ \max[-1, 3], [2, 5] &= [2, 5]. \end{aligned}$$

3.1.2. Función de inclusión

Definición 3.3 Sea \mathbf{f} una función de \mathbb{R}^n a \mathbb{R}^m entonces, la función de intervalo $[\mathbf{f}]$ de \mathbb{IR}^n a \mathbb{IR}^m es una *función de inclusión* de \mathbf{f} si,

$$\forall [\mathbf{x}] \in \mathbb{IR}^n, \mathbf{f}([\mathbf{x}]) \subset [\mathbf{f}]([\mathbf{x}]) \quad (3.13)$$

La función de inclusión $[\mathbf{f}]$ es,

$[\mathbf{f}]$ es mónico	si	$([\mathbf{a}] \subset [\mathbf{b}]) \Rightarrow ([\mathbf{f}]([\mathbf{a}]) \subset [\mathbf{f}]([\mathbf{b}]))$
$[\mathbf{f}]$ es mínima	si	$\forall [\mathbf{a}] \in \mathbb{IR}^n, [\mathbf{f}]([\mathbf{a}]) = [\mathbf{f}([\mathbf{a}])]$
$[\mathbf{f}]$ es delgada	si	$w([\mathbf{a}]) = 0 \Rightarrow w([\mathbf{f}]([\mathbf{a}]))$
$[\mathbf{f}]$ es convergente	si	$\lim_{k \rightarrow \infty} w([\mathbf{a}](k)) = 0 \Rightarrow \lim_{k \rightarrow \infty} w([\mathbf{f}]([\mathbf{a}](k)))$

3.2. Contractores

Un contractor es una operación que se aplica a un intervalo con la finalidad de encontrar el conjunto más pequeño que contiene la solución a un problema que se ha planteado bajo el enfoque de análisis de intervalos.

Definición 3.4 El operador $\mathcal{C}_{\mathbb{X}}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ es un *contractor* para el subconjunto cerrado \mathbb{X} de \mathbb{R}^n si satisface,

$$\forall [\mathbf{x}] \in \mathbb{R}^n, = \begin{cases} \mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{x}]) \subset [\mathbf{x}] \text{ (Contracción)} \\ \mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{x}]) \cap \mathbb{X} = [\mathbf{x}] \cap \mathbb{X} \text{ (Inclusión)} \end{cases}$$

diremos que,

$\mathcal{C}_{\mathbb{X}}$ es mónico	si	$[\mathbf{a}] \subset [\mathbf{b}] \Rightarrow \mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{a}]) \subset \mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{b}])$
$\mathcal{C}_{\mathbb{X}}$ es mínima	si	$\forall [\mathbf{a}] \in \mathbb{R}^n, \mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{a}]) = [[\mathbf{a}] \cap \mathbb{X}]$
$\mathcal{C}_{\mathbb{X}}$ es delgada	si	$\forall \mathbf{a} \in \mathbb{R}^n, \mathcal{C}_{\mathbb{X}}(\{\mathbf{a}\}) = \{\mathbf{a}\} \cap \mathbb{X}$
$\mathcal{C}_{\mathbb{X}}$ es idempotente	si	$\forall [\mathbf{a}] \in \mathbb{R}^n, \mathcal{C}_{\mathbb{X}}(\mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{a}])) = \mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{a}])$
$\mathcal{C}_{\mathbb{X}}$ es convergente	si	$[\mathbf{a}](k) \rightarrow \mathbf{a} \Rightarrow \mathcal{C}_{\mathbb{X}}([\mathbf{a}](k)) \rightarrow \{\mathbf{a}\} \cap \mathbb{X}$

Ejemplo 3.1 Considere 3 variables x, y, z y además asuma que

$$\begin{aligned} x &\in [1, 5], y \in [2, 4], z \in [6, 10] \\ z &= x + y \end{aligned} \tag{3.14}$$

Los dominios anteriores realizables para x, y, z pueden ser contraídos removiendo los valores inconsistentes. Por ejemplo el valor 10 es inconsistente por que

$$\forall x \in [1, 5] \text{ y } \forall y \in [2, 4], x + y \neq 10$$

y el valor de 1 es inconsistente para x porque

$$\forall y \in [2, 4] \text{ y } \forall z \in [6, 10], 1 + y \neq z$$

Proyectar una restricción (en este caso, $z = x + y$) es calcular el intervalo más pequeño el cual contiene todos los valores consistentes. En nuestro ejemplo, esto equivale a proyectar/contrair 3 veces (i.e con respecto a x, y, z) el conjunto \mathbb{R}^3 definido por.

$$\mathbb{S} = \{(x, y, z) \in [1, 5] \times [2, 4] \times [6, 10] | z = x + y\}$$

El método para calcular la proyección de \mathbb{S} con respecto a x, y y z se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
z = x + y &\Rightarrow z \in [6, 10] \cap ([1, 5] + [2, 4]) \\
&= [6, 10] \cap [3, 9] = [6, 9] \\
x = z - y &\Rightarrow x \in [1, 5] \cap ([6, 10] - [2, 4]) \\
&= [1, 5] \cap [2, 8] = [2, 5] \\
y = z - x &\Rightarrow y \in [6, 10] \cap ([6, 10] - [1, 5]) \\
&= [2, 4] \cap [1, 9] = [1, 5] = [2, 4]
\end{aligned}$$

Como se mencionó al principio de este breve pero ilustrativo ejemplo, existían dos valores inconsistentes en los intervalos solución que se proponían inicialmente, después de aplicar las operaciones de contracción se demostró el porqué los valores 1 y 10, no son elementos de la solución.

3.3. Propagación de restricciones

3.3.1. Conjunto de restricciones para satisfacción del problema (CRSP)

Considere un sistema no lineal en tiempo discreto representado por,

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}_k &= \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_{k-1}, p, \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \\
\mathbf{y}_k &= \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k, p, \mathbf{w}_k, \mathbf{u}_k)
\end{aligned} \quad k = 1, \dots, \bar{k} \quad (3.15)$$

donde \mathbf{k} es el índice de tiempo, \mathbf{x}_k representa el vector de estados, \mathbf{y}_k define el vector de salida, \mathbf{u}_k describe el vector de entrada, \mathbf{w}_k denota el vector de perturbación, p contiene el vector de parámetros constantes con \mathbf{f}_k y \mathbf{g}_k funciones conocidas que describen la dinámica del sistema.

El conjunto de todas las variables involucradas en este problema serán:

$$\mathcal{V} = \{p, x_0, w_0, u_0, x_1, w_1, u_1, y_1, \dots, x_{\bar{k}}, w_{\bar{k}}, u_{\bar{k}}, y_{\bar{k}}\}$$

Se asume que existen algunos valores actuales, descritos por: \mathbf{x}_k^* , \mathbf{w}_k^* , \mathbf{u}_k^* , \mathbf{y}_k^* y \mathbf{p}_k^* , para \mathbf{x}_k , \mathbf{w}_k , \mathbf{u}_k , \mathbf{y}_k y \mathbf{p}_k tal que la ecuación (3.15) se satisface. Esta asunción permitirá interpretar el problema de estimación como uno para encontrar los estados realizables de los valores actuales.

Para poder encontrar los estados desconocidos realizables será necesario utilizar el enfoque de pertenencia de conjuntos (*set-membership*), la incertidumbre en el valor del estado actual \mathbf{v}^* de cualquier variable $\mathbf{v} \in \mathcal{V}$ estará asociado a un dominio \mathbb{V} que contiene a \mathbf{v}^* , el conjunto de todos los dominios es,

$$\mathcal{D} = \{\mathbb{P}, \mathbb{X}_0, \mathbb{W}_0, \mathbb{U}_0, \mathbb{X}_1, \mathbb{W}_1, \mathbb{U}_1, \mathbb{Y}_1, \dots, \mathbb{X}_{\bar{k}}, \mathbb{W}_{\bar{k}}, \mathbb{U}_{\bar{k}}, \mathbb{Y}_{\bar{k}}\}.$$

De la ecuación (3.15) se asume que las variables \mathbf{y}_k y \mathbf{u}_k pueden ser medidas, dos casos se desprenden de esta asunción:

contexto causal: en el instante k las mediciones están disponibles solamente hasta el tiempo k , *i.e.* los datos disponibles son $\{\mathbf{u}_0^m, \mathbf{u}_1^m, \mathbf{y}_1^m, \dots, \mathbf{u}_k^m, \mathbf{y}_k^m\}$.

contexto no causal: todas las mediciones $\{\mathbf{u}_0^m, \mathbf{u}_1^m, \mathbf{y}_1^m, \dots, \mathbf{u}_k^m, \mathbf{y}_k^m, \dots, \mathbf{u}_{\bar{k}}^m, \mathbf{y}_{\bar{k}}^m\}$ están disponibles desde el inicio.

La idea básica detrás del problema de estimación de un conjunto haciendo uso del análisis de intervalos, es encontrar el dominio más pequeño $\hat{\mathbb{P}}, \hat{\mathbb{X}}_0, \hat{\mathbb{W}}_0, \hat{\mathbb{U}}_0, \hat{\mathbb{X}}_1, \hat{\mathbb{W}}_1, \hat{\mathbb{U}}_1, \hat{\mathbb{Y}}_1, \dots, \hat{\mathbb{X}}_{\bar{k}}, \hat{\mathbb{W}}_{\bar{k}}, \hat{\mathbb{U}}_{\bar{k}}$ y $\hat{\mathbb{Y}}_{\bar{k}}$ tal que la siguiente implicación es satisfecha.

$$\left\{ \begin{array}{l} (3.15) \text{ permanece verdadera y} \\ \mathbf{p} \in \mathbb{P} \\ \mathbf{x}_0 \in \mathbb{X}_0, \dots, \mathbf{x}_{\bar{k}} \in \mathbb{X}_{\bar{k}} \\ \mathbf{w}_0 \in \mathbb{W}_0, \dots, \mathbf{w}_{\bar{k}} \in \mathbb{W}_{\bar{k}} \\ \mathbf{u}_0 \in \mathbb{U}_0, \dots, \mathbf{u}_{\bar{k}} \in \mathbb{U}_{\bar{k}} \\ \mathbf{y}_1 \in \mathbb{Y}_1, \dots, \mathbf{y}_{\bar{k}} \in \mathbb{Y}_{\bar{k}} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{p} \in \hat{\mathbb{P}} \\ \mathbf{x}_0 \in \hat{\mathbb{X}}_0, \dots, \mathbf{x}_{\bar{k}} \in \hat{\mathbb{X}}_{\bar{k}} \\ \mathbf{w}_0 \in \hat{\mathbb{W}}_0, \dots, \mathbf{w}_{\bar{k}} \in \hat{\mathbb{W}}_{\bar{k}} \\ \mathbf{u}_0 \in \hat{\mathbb{U}}_0, \dots, \mathbf{u}_{\bar{k}} \in \hat{\mathbb{U}}_{\bar{k}} \\ \mathbf{y}_1 \in \hat{\mathbb{Y}}_1, \dots, \mathbf{y}_{\bar{k}} \in \hat{\mathbb{Y}}_{\bar{k}} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

Entonces $\hat{\mathbb{V}} \subset \mathbb{V}$ lo que quiere decir que $\hat{\mathbb{V}}$ puede ser reemplazado por \mathbb{V} como un dominio de mayor precisión para \mathbf{v} . Esta operación de reemplazo puede ser escrita de manera más concisa como.

$$\mathcal{D} := \mathcal{E}(\mathcal{D}) \quad (3.17)$$

El estimador de conjuntos basado en (3.17) puede ser descrito en forma de algoritmo de la manera siguiente.

- | | |
|----------------|--|
| Inicialización | conjunto \mathcal{D} tiene información disponible y específica; |
| 1 | los dominios son reducido usando $\mathcal{D} := \mathcal{E}(\mathcal{D})$; |
| 2 | espera por una nueva medición v^m ; |
| 3 | en \mathcal{D} , se reemplaza \mathbb{V} por $\mathbb{V} \cap \phi_v(v^m)$; |
| 4 | regresar al paso 1 |

En un sentido formal el algoritmo descrito anteriormente puede ser definido como por un **conjunto de soluciones al problema de restricción (CSPR)**.

Un **conjunto de soluciones al problema de restricción (CSPR)** es una 3-upla $\mathcal{H} = (\mathcal{V}, \mathcal{D}, \mathcal{C})$, donde $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ es un conjunto finito de vectores variables, $\mathcal{D} = \{\mathbb{V}_1, \dots, \mathbb{V}_n\}$ define el conjunto de todos los dominios y \mathcal{C} representa un conjunto finito de restricciones relacionadas con \mathcal{V} . El objetivo de esta técnica de propagación es contraer tanto como sea posible los dominios para las variables sin perder cualquiera de las soluciones.

Ejemplo 3.2

$$(\mathcal{C}_1) : y = x^2$$

$$(\mathcal{C}_2) : xy = 1$$

$$(\mathcal{C}_3) : y = -2x + 1$$

para cada una de las variables, inicialmente asociaremos el dominio $\mathcal{D} =] - \infty, \infty[$. La propagación de restricciones consiste en proyectar/contraer todas las restricciones hasta encontrar la mínima solución, ver Figura 3.1

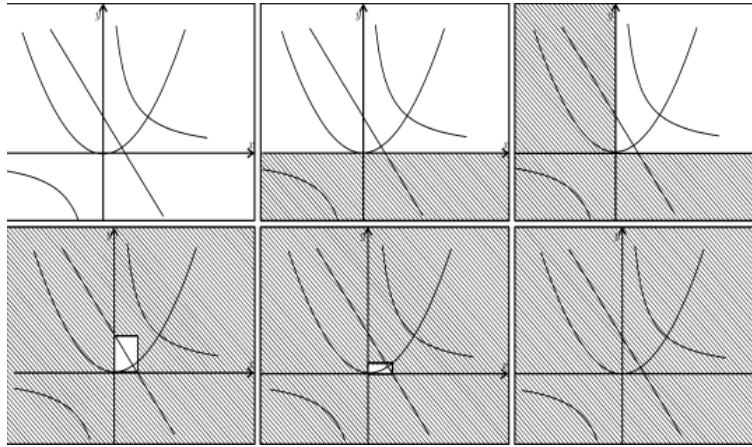


Figura 3.1: Representación gráfica del ejemplo 1.2.

Aplicando el calculo de restricciones

$$(\mathcal{C}_1) \Rightarrow y \in]-\infty, \infty[^2 = [0, \infty[$$

$$(\mathcal{C}_2) \Rightarrow x \in 1/[0, \infty[= [0, \infty[$$

$$\begin{aligned} (\mathcal{C}_3) \Rightarrow y &\in [0, \infty[\cap ((-2) \cdot [0, \infty[+ 1) \\ &= [0, \infty[\cap (]-\infty, 1]) = [0, 1] \\ x &\in [0, \infty[\cap (-[0, 1]/2 + 1/2) \\ &= [0, 1/2] \end{aligned}$$

$$(\mathcal{C}_1) \Rightarrow y \in [0, 1] \cap [0, 1/2]^2 = [0, 1/4]$$

$$(\mathcal{C}_2) \Rightarrow x \in [0, 1/2] \cap 1/[0, 1/4] = \emptyset$$

$$y \in [0, 1/4] \cap 1/\emptyset = \emptyset$$

3.3.2. Aplicación del CSPR a un AUV

De la sección (2.8.1) vemos que la ecuación (2.85) tiene la forma de la ecuación (3.15) de tal manera que el problema de localización de un AUV representado por un modelo cinemático puede ser resuelto como un caso de conjunto de restricciones para satisfacción del problema (CRSP). Donde $\mathbb{X}_k, \mathbb{Y}_k$ representa el conjunto dominio que contiene la información previa de x_k, y_k respectivamente. Por simplicidad se asume que no hay ninguna información específica previa disponible en x_1, \dots, x_k . En consecuencia $\hat{\mathbb{X}}_1, \dots, \hat{\mathbb{X}}_k$ son

tomados como \mathbb{R}^n . Las mediciones pasadas y_i , $0 \leq i \leq k$ son utilizadas para formar el dominio realizable previo $\hat{\mathbb{Y}}_i$ basado en su realizabilidad este se puede escribir como sigue,

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f_k \circ g_k^{-1}(y_k) \\ x_{k+1} &= f_k \circ f_{k-1} \circ g_{k-1}^{-1}(y_{k-1}) \\ &\vdots \\ x_{k+1} &= f_k \circ f_{k-1} \circ \dots \circ f_{k-n} \circ g_{k-n}^{-1}(y_{k-n}) \\ x_{k+1} &= f_k(x_k) \end{aligned}$$

Recordar que nuestro problema de localización fue convertido a un problema (CSPR). La Tabla 3.1 describe un algoritmo CSPR para resolver el problema de localización. El algoritmo inicia con el intervalo solución más grande, en este caso las dimensiones del espacio confinado $\mathbb{X}_0 = [0, L_x]$ y $\mathbb{Y}_0 = [0, L_y]$, donde L_x y L_y son las longitudes del área de pruebas, después el algoritmo inicia la contracción sobre la ecuación cinemática hasta que el vehículo obtiene información de distancia hacia los límites del área de pruebas l . En el momento que obtiene información de distancia, significa que el vehículo ha alcanzado un límite físico en este caso una pared, entonces el algoritmo contrae sobre el eje que el vehículo estaba haciendo la navegación .

Teorema 3.1 *El conjunto $\hat{\mathbb{X}}$ calculado por la Tabla 3.1 contiene todos los estados realizables que son consistentes con los datos pasados y además es el conjunto más pequeño con respecto a la inclusión.*

3.4. Resultados en simulación y experimentos

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos primero en simulación y después en experimentos en tiempo real para el algoritmo de localización propuesto en este capítulo. En un inicio el vehículo se encuentra encerrado en un área delimitada por la caja $[X] \times [Y]$, sin embargo este no conoce su posición a *priori* dentro de la caja. El tamaño de esta caja afectará la velocidad de convergencia en la estimación de la posición, es decir, cuando más grande sea la caja más tardará el vehículo en estimar su posición. A menos

que una medición proveniente de los sensores proporcione información de la distancia entre uno de los límites de la caja y el vehículo, este corregirá y sabrá exactamente su posición dentro de la caja, haciendo contracción sobre el eje del que recibió información.

Para poder conocer su posición dentro de la caja, el vehículo primero avanza manteniendo un rumbo fijo hasta poder detectar una de las fronteras de la caja, esta detección es posible a través de las mediciones de distancia que proporciona el sensor laser a bordo. Al alcanzar el límite físico del espacio donde esta confinado el vehículo, este se detiene completamente y gira $\frac{\pi}{2}$ en torno al eje z , después avanza hasta el siguiente límite y repite esta operación hasta detectar los 4 bordes de la caja, en ese momento el vehículo puede estimar su posición dentro de la caja con aceptable precisión.

3.4.1. Validación en simulación

Previo a la implementación en tiempo real del algoritmo propuesto para la localización del *AUV* se realizó una simulación con la finalidad de realizar ajustes en el modelo utilizado. Este algoritmo hace uso del modelo cinemático descrito en la sección 2.8.1, la posición es calculada en cada instante k haciendo uso de *dead reckoning* y bajo la consideración de que las corrientes son muy bajas o nulas. En las Figuras. 3.2 y 3.3 se ilustra el comportamiento del vehículo y la convergencia del estimador de posición. La ventaja del uso de esta técnica radica en que la posición del vehículo dentro de la caja $[X] \times [Y]$ esta garantizada aún en presencia de valores atípicos (errores en la medición) del sensor laser, ver [62].

En la Figura 3.2 se puede observar el momento en que la contracción es aplicada sobre el eje X , de manera similar la contracción realizada sobre el eje Y es ilustrada en la Figura 3.3. La contracción es indicada por el símbolo (*). En ese preciso instante, el vehículo sabe exactamente su posición y distancia con respecto a la pared detectada. La información de distancia se conoce a partir de las mediciones efectuadas por el sensor laser.

3.4.2. Validación en tiempo real

Para poder confirmar la efectividad del algoritmo propuesto se realizaron pruebas en dos prototipos de características muy similares pero de diferente tamaño, **Sardine** y

CHAAK. El algoritmo fue calculado a bordo en ambos vehículos. La objetivo principal era el de obtener iguales o mejores resultados que los obtenidos en simulación. La restricción para este problema son las dimensiones del área de la piscina donde se realizaron las pruebas.

3.4.2.1. Resultados con el vehículo Sardine

Los primeros experimentos se realizaron en el vehículo Sardine propiedad de *ENSTA-Bretagne*, así mismo las pruebas fueron realizadas en sus instalaciones. La piscina donde se realizaron los experimentos tiene dimensiones 3×4 m, de tal forma que el intervalo solución para el problema es: $X = [0, 3]m$ y $Y = [0, 4]m$. Las condiciones del experimento fueron las siguientes, el vehículo es liberado en cualquier punto dentro del intervalo solución (piscina).

La primer etapa para estimar la posición del vehículo inicia fijando el rumbo del vehículo y avanzando hacia adelante, este navega estimando su posición a través del calculo de intervalos hasta que encuentra uno de los límites físicos de la piscina, en ese momento debido a la información proveniente del sensor laser a bordo el vehículo corrige el error acumulado por los intervalos.

En una segunda etapa el vehículo después de haber localizado el primer límite del intervalo solución, se detiene, gira $\frac{\pi}{2}rad$ para continuar su trayecto en linea recta hasta encontrar el segundo límite del espacio solución. Este proceso se repite al menos 2 veces más hasta poder estimar su posición dentro la piscina. La Figura 3.5 ilustra la trayectoria que el vehículo estimó después de haber ejecutado su tarea de localización.

La Figura 3.6 y 3.7 ilustran el comportamiento de la estimación sobre el eje x y y respectivamente. Por ejemplo, en la Fig. 3.6, se observan 3 líneas, una para el valor superior de la caja, otra para para el valor mínimo de la caja y la tercera es la que indica la posición del vehículo dentro de la caja. Como se puede observar inicialmente la caja en su eje X posee un valor de $[0, 3]$, cada vez que el vehículo llega a un límite físico, ocurre una contracción de este intervalo y empieza a crecer cuando cambia de rumbo. Análogamente, sucede lo mismo con el eje y .

Un video de este experimento se puede consultar en:

<http://www.ctrl.cinvestav.mx/~itorres/foto.html>

3.4.2.2. Resultados con el vehículo CHAAK

Después de haber probado experimentalmente la eficiencia del algoritmo propuesto para el vehículo Sardine, se procedió a implementar el mismo algoritmo en **CHAAK**, pero a diferencia del experimento anterior, en este nuevo, se conoce la posición de una ventana existente en la cisterna (experimento realizado en CINVESTAV).

La cisterna donde se realizaron los experimentos tiene dimensiones 3.5×3.5 m, muy similar a las condiciones anteriores. Como en el caso anterior estas dimensiones serán el intervalo solución de nuestro problema de localización, es decir $X = [0, 3.5]m$ y $Y = [0, 3.5]m$, tal como en el caso anterior el vehículo es liberado en cualquier punto dentro del espacio solución (cisterna) para poder iniciar la localización.

El procedimiento de navegación/localización se repite como en el caso del vehículo Sardine, la diferencia radica en que después de que el vehículo ha estimado su posición (identificación de los 4 límites físicos) esta información es utilizada como una retroalimentación de la posición del vehículo dentro del espacio solución (piscina). Desde el inicio de la tarea de localización el vehículo sabe que la ventana objetivo se encuentra en: $X = [1.3, 1.7]m$ y $Y = [0, 0]m$, pero no sabe donde se encuentra él, es por esto que después de estimar su posición, este puede navegar hacia el objetivo y atravesarlo, demostrando así la efectividad del algoritmo. La Figura 3.8, muestra la posición estimada del vehículo, así como la posición cuando este atraviesa el objetivo.

El objetivo en este experimento fue que el vehículo CHAAK cruzara la ventana existente en la cisterna. En las Figuras 3.9 y 3.10 se ilustra el buen desempeño del algoritmo ya que el vehículo alcanzó el objetivo.

Un video de este experimento se puede consultar en:

<http://www.ctrl.cinvestav.mx/~itorres/foto.html>

Tabla 3.1: Algoritmo de localización

Algoritmo: g_k (entrada: ψ, l, V , salida: \hat{x}_k, \hat{y}_k)	
1	$\mathbb{X} = \mathbb{X}_0$
2	$\mathbb{Y} = \mathbb{Y}_0$
3	for $i = 1$ to k
4	$\mathbb{X}_1 = \mathbb{X} + V \cos(\psi)T_s$
5	$\mathbb{Y}_1 = \mathbb{Y} + V \sin(\psi)T_s$
6	$\mathbb{X}_2 = \mathbb{X}_1 \cap \mathbb{X}_0$
7	$\mathbb{Y}_2 = \mathbb{Y}_1 \cap \mathbb{Y}_0$
8	$\mathbb{X} = \mathbb{X}_2$
9	$\mathbb{Y} = \mathbb{Y}_2$
10	if ($pared = 1$) $\mathbb{Y} = \mathbb{Y} \cap [l]$
11	if ($pared = 2$) $\mathbb{X} = \mathbb{X} \cap [L_x - l]$
12	if ($pared = 3$) $\mathbb{Y} = \mathbb{Y} \cap [L_y - l]$
13	if ($pared = 4$) $\mathbb{X} = \mathbb{X} \cap [l]$
14	$\hat{x}_k = \hat{\mathbb{X}}/2$
15	$\hat{y}_k = \hat{\mathbb{Y}}/2$

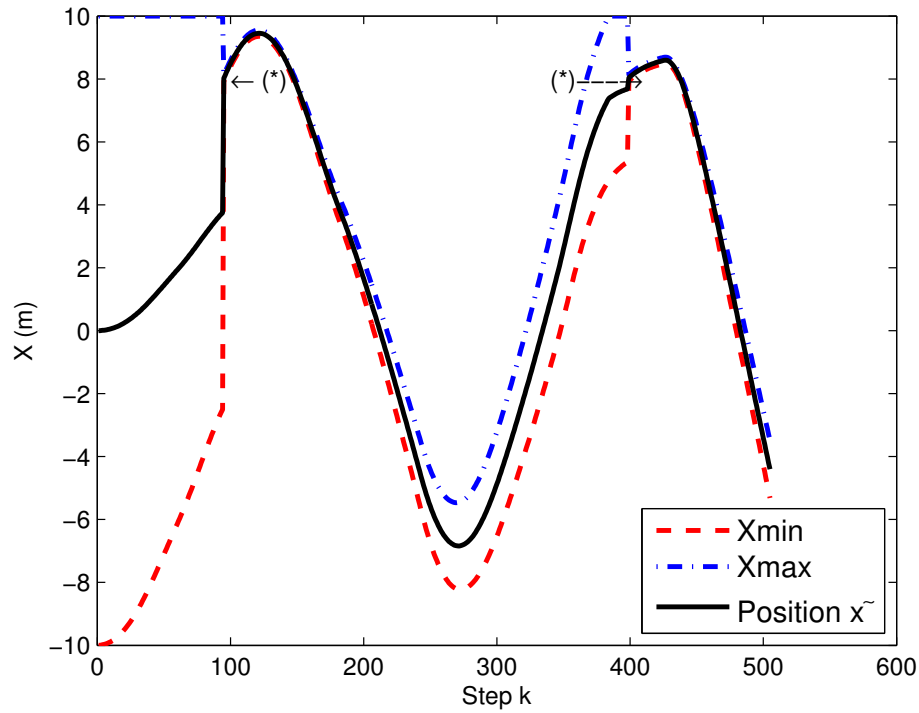


Figura 3.2: Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [X].

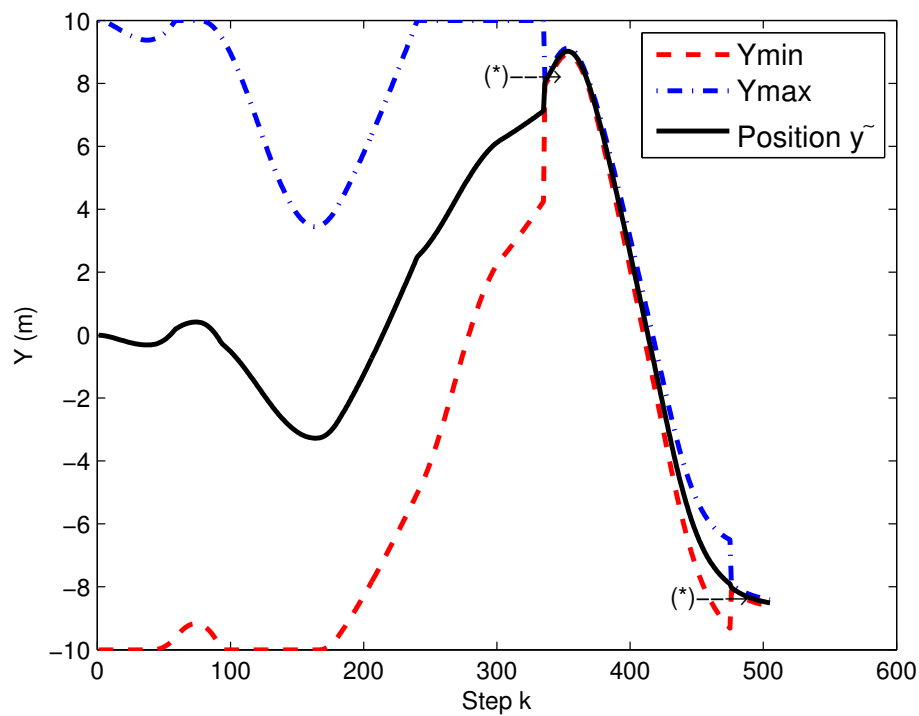


Figura 3.3: Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [Y].

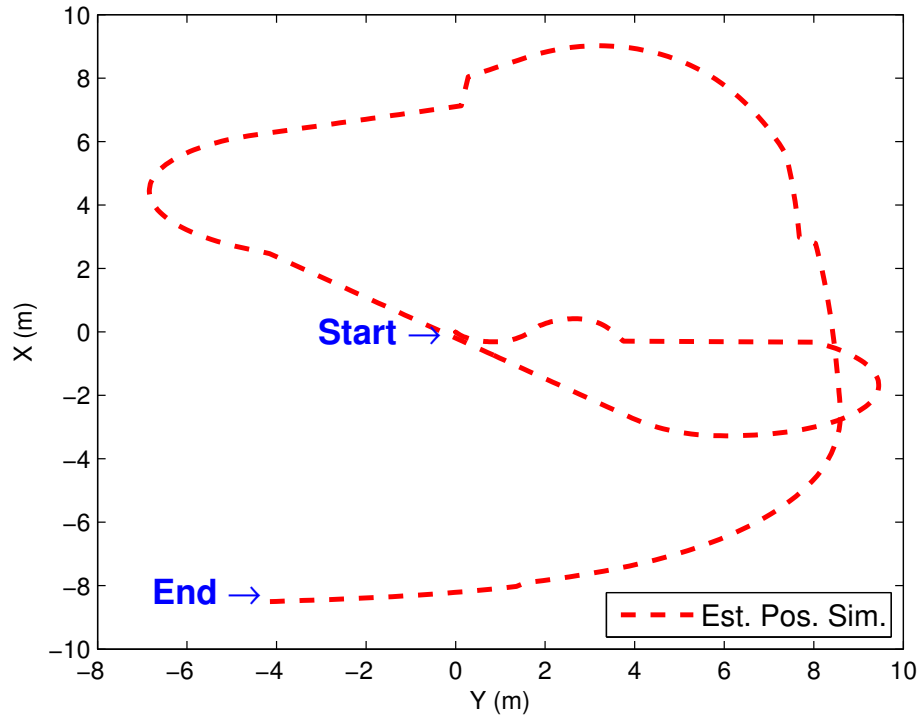


Figura 3.4: Posición estimada (\hat{x}, \hat{y}) en simulación en la alberca.

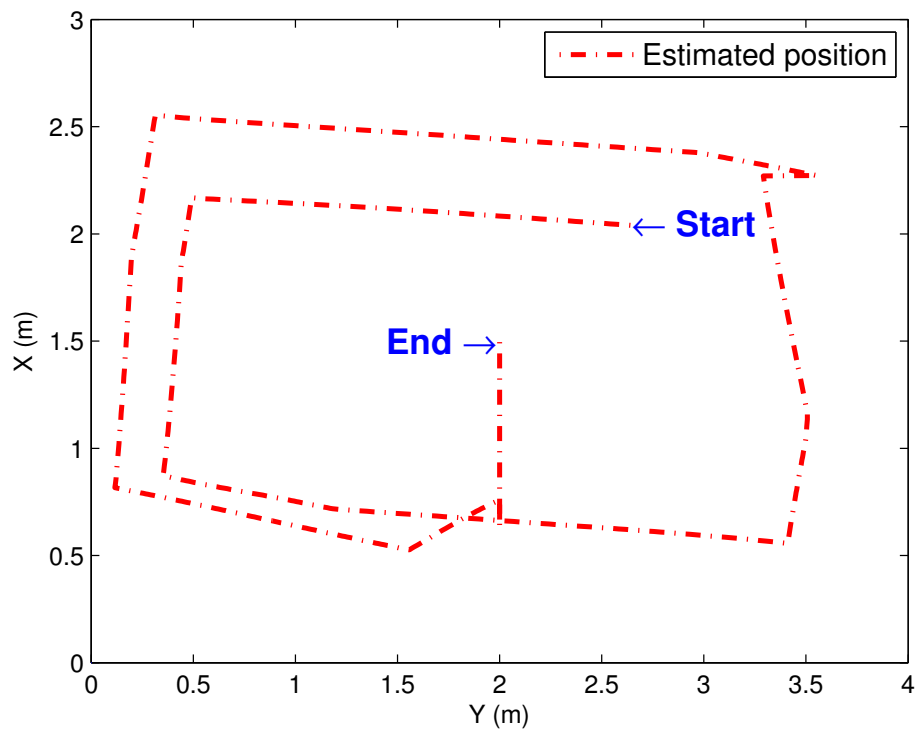


Figura 3.5: Posición estimada (\hat{x}, \hat{y}) dentro de la alberca.

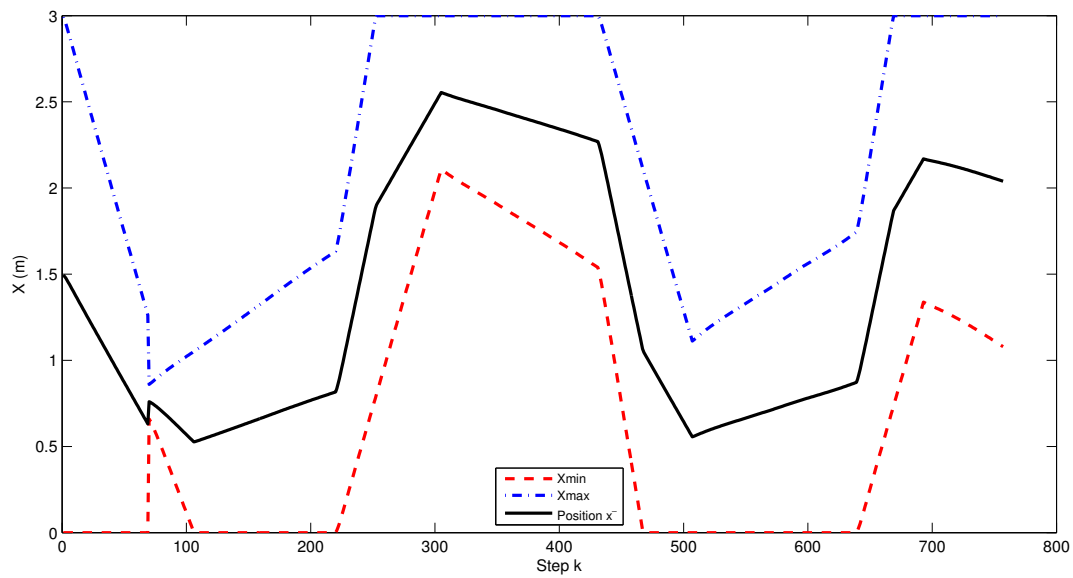


Figura 3.6: Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [X].

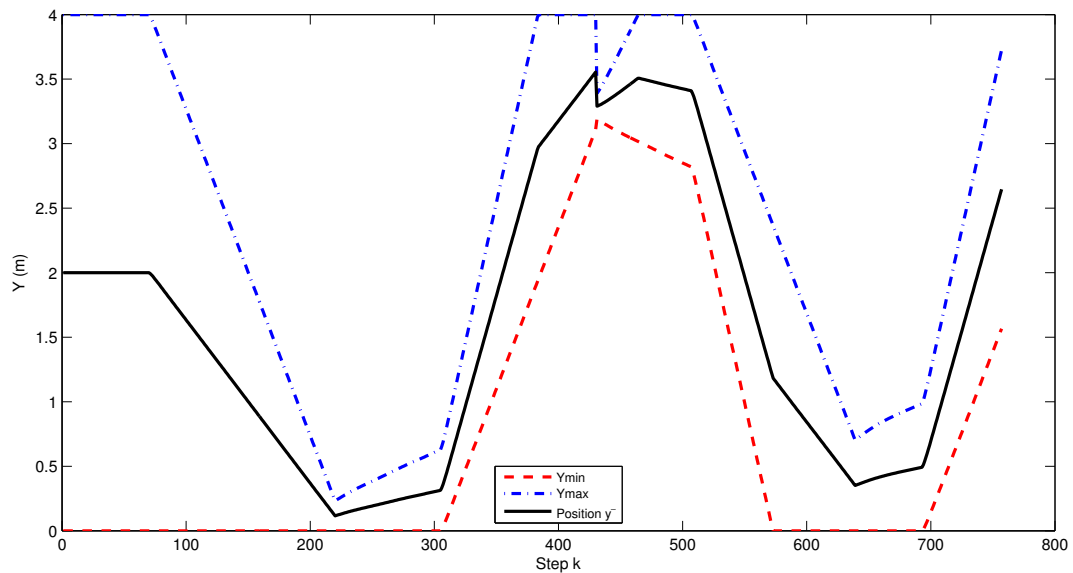


Figura 3.7: Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [Y].

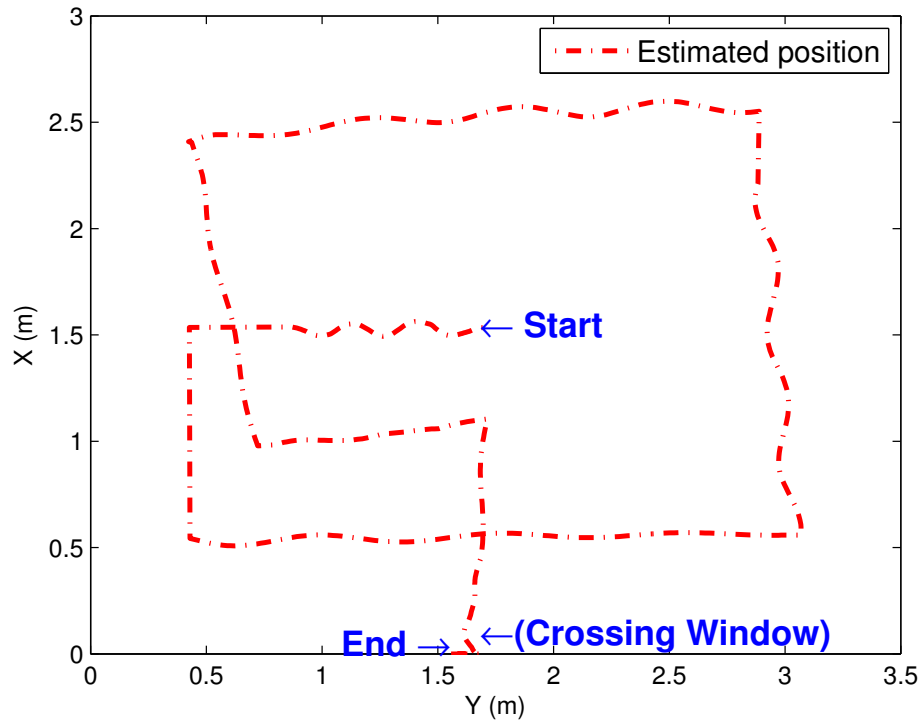


Figura 3.8: Posición estimada (\hat{x}, \hat{y}) dentro de la alberca para el vehículo CHAAK.

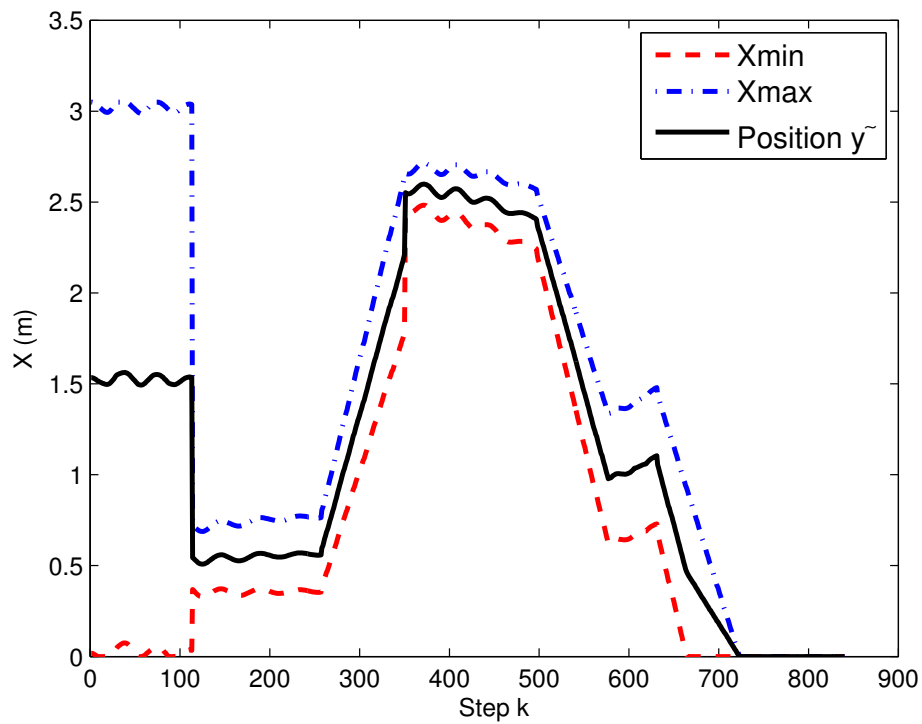


Figura 3.9: Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje $[X]$.

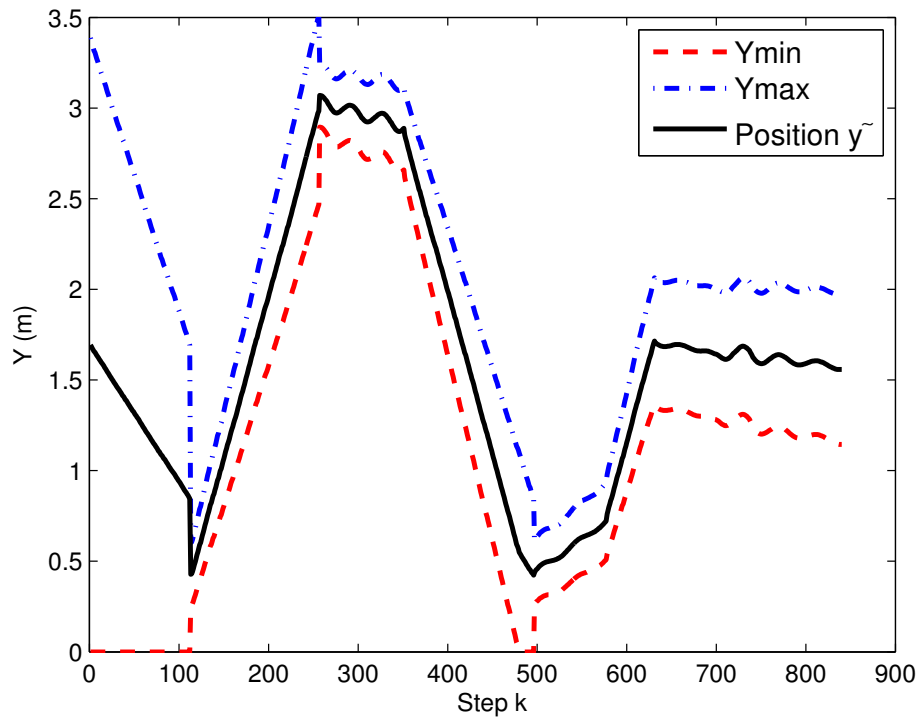


Figura 3.10: Posición del vehículo dentro del intervalo para el eje [Y].

Navegación

La navegación de vehículos acuáticos está ligada a perturbaciones ambientales tales como el viento y las corrientes marinas en superficie, por mencionar algunas. En la sección 1.4.3, se describió brevemente como se estiman y además se describieron las características de estas perturbaciones. De forma análoga la navegación de los vehículos submarinos es afectada por corrientes submarinas. En este capítulo abordaremos el problema de navegación en presencia de corrientes submarinas.

Para abordar este problema consideraremos que el vehículo CHAAK-AUV, está navegando en presencia de estas, ver Figura 4.1.

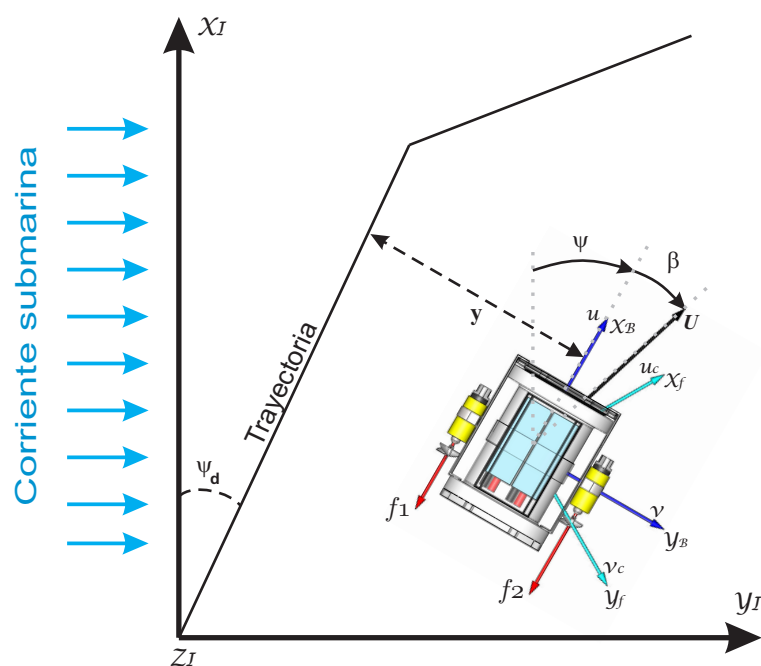


Figura 4.1: Navegación en presencia de corriente submarina

En la Figura 4.1 se describen 3 marcos de referencia, el marco inercial \mathcal{I} representado por (x_I, y_I, z_I) , el marco del cuerpo \mathcal{B} representado por (x_B, y_B, z_B) y finalmente el marco del flujo (corriente submarina, perturbación) \mathcal{F} descrito por (x_f, y_f, z_f) . La relación que existe entre las variables angulares descritas en la Figura 4.1 será expresada por la relación **curso**, **rumbo** y **deriva**. De esta manera, el **curso** (χ) será equivalente a la suma del **rumbo** (ψ) más la **deriva** (β), $\chi = \psi + \beta$.

Una de las características de este vehículo es que por diseño es estable en los planos \mathbf{xz} y \mathbf{yz} , es decir, la distancia de separación entre el centro de gravedad y el centro de flotabilidad es suficientemente grande como para considerar que el ángulo de *roll* y *pitch* son casi nulos ($\phi \approx 0$ y $\theta \approx 0$).

Un problema de control interesante es referente a la navegación del vehículo en presencia de perturbaciones externas y desconocidas como las corrientes submarinas. Este tipo de perturbaciones generalmente desvían el vehículo de su trayectoria deseada y al no contar dicho vehículo con sensores que midan este tipo de perturbaciones, este podría en un tiempo t alejarse demasiado de su trayectoria y perderse. Este tipo de desafíos se pueden analizar en 2D, 3D, o en una sola dimensión. Nuestro vehículo por construcción es estable en *pitch* y *roll* además de estar desacoplado en la dinámica de profundidad y de rumbo, estas características permiten estudiar y analizar su navegación en el plano xy , lo cual no facilita o resuelve el problema pero si permite analizarlo con otra expectativa. De esta manera, se puede observar que el modelo cinemático en este plano puede ser descrito de la siguiente manera, ver [35].

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} &= r\end{aligned}\tag{4.1}$$

Considerando que el vehículo posee flotabilidad neutra, *i.e.*, que su centro de masa es colineal con el centro de flotabilidad y que además posee 2 planos de simetría. Entonces, la dinámica del *AUV* en el plano horizontal será representada por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
m_u \dot{u} - m_v v r + d_u u &= \tau_u \\
m_v \dot{v} - m_v u r + d_v v &= 0 \\
m_r \dot{r} - m_v u v + d_r r &= \tau_r
\end{aligned} \tag{4.2}$$

donde:

$$\begin{aligned}
m_u &= m - X_{\dot{u}}, & d_u &= -X_u - X_{|u|u} |u|, \\
m_u &= m - Y_{\dot{v}}, & d_v &= -Y - Y_{|v|v} |v|, \\
m_u &= I_z - N_{\dot{r}}, & d_r &= -N_r - N_{|r|r} |r|, \\
m_u &= m_u - m_v,
\end{aligned}$$

En presencia de una corriente oceánica irrotacional v_c definida en el marco del flujo \mathcal{F} con velocidades u_c y v_c , la ecuación dinámica anterior se reescribe como:

$$\begin{aligned}
m_u \dot{u}_r - m_v v_r r + d_u u_r &= \tau_u \\
m_v \dot{v}_r - m_v u_r r + d_v v_r &= 0 \\
m_r \dot{r} - m_v u_r v_r + d_r r &= \tau_r
\end{aligned} \tag{4.3}$$

donde la ecuación (4.1) se conserva si $u = u_r + u_c$ y $v = v_r + v_c$, donde u_r y v_r son las componentes del vector de velocidad del vehículo con respecto a la corriente submarina; así mismo $d_{u_r} = -X_u - X_{|u|u} |u_r|$ y $d_{v_r} = -Y - Y_{|v|v} |v_r|$. Las ecuaciones de la dinámica actuada del vehículo pueden ser escritas en una forma compacta como,

$$M \dot{u} + C(v_r) u + D u = \tau + v_c. \tag{4.4}$$

donde $u = [u_r, r]^T$

$$M = \begin{bmatrix} m_u & 0 \\ 0 & m_r \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -m_v v_r \\ -m_{uv} v_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{u_r} & 0 \\ 0 & d_r \end{bmatrix}$$

Debido al diseño del vehículo, este se desplazará a bajas velocidades. Por esta razón la contribución de la matriz C en la dinámica del vehículo es mínima y por lo tanto sin pérdida de generalidad y para fines de control se considera nula. Por lo tanto podemos reescribir la ecuación (4.4) de la siguiente manera:

$$M\dot{u} + Du = \tau + v_c \quad (4.5)$$

4.1. Controlador cinético y cinemático

De acuerdo al modelo (4.5) mencionado en la sección anterior; en esta sección se desarrollará la estrategia de control a utilizar. En la Figura 4.2, se ilustra la estrategia que hemos seleccionado para controlar el vehículo cuando este navega en presencia de corrientes submarinas. Se observa entonces que existen 2 lazos de control, el lazo interno que refiere a la dinámica rápida del sistema, y el lazo externo correspondiente a la dinámica lenta del sistema.

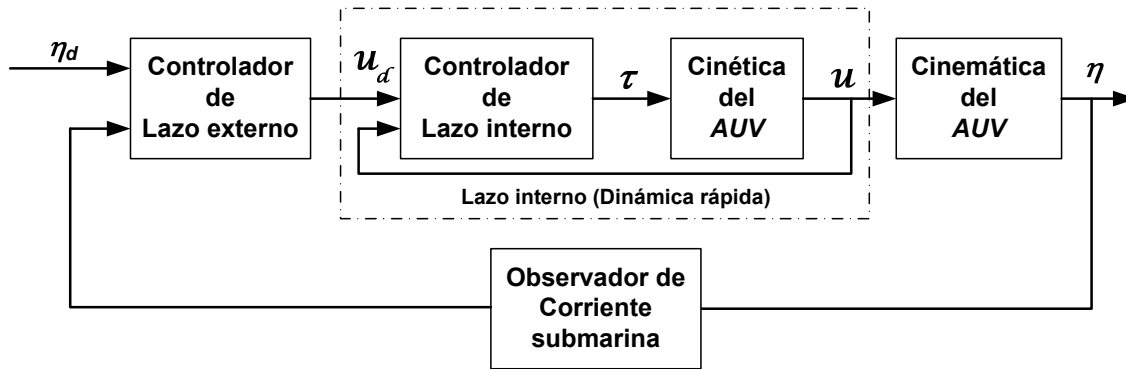


Figura 4.2: Problema de control dividido en cinemático y dinámico

De la ecuación (4.5) y bajo la consideración de que conocemos todos los parámetros hidrodinámicos del vehículo, se propone una ley de control por retroalimentación de estados que permitirá estabilizar el vehículo en orientación alrededor del eje Z, *i.e.*, el control de rumbo (ψ) el cual está descrito por la siguiente ecuación:

$$\tau = Du + M\tau_u. \quad (4.6)$$

Introduciendo la ecuación (4.6) en la ecuación (4.5) obtenemos,

$$\dot{u} = \tau_u + v_c \quad (4.7)$$

De la ecuación (4.1) sabemos que durante condiciones de crucero, *i.e.*, $u \gg 0$ y $v \approx 0$ la velocidad del vehículo se define por $U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u$ de tal manera que la ecuación (4.1) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= U \cos(\psi) \\ \dot{y} &= U \sin(\psi) \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (4.8)$$

Se considera el escenario descrito en la Figura 4.2 donde el vehículo CHAAK-AUV navega en presencia de corriente submarina irrotacional, la cual es representada de manera general como v_c . Note de la Figura 4.2 que el vehículo esta navegando en el plano xy , por lo tanto, v_c puede ser expresada por sus componentes $w \cos(\psi_w)$ y $w \sin(\psi_w)$; de tal manera que el modelo cinemático que consideraremos tiene la forma,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= U \cos(\psi) + w \cos(\psi_w) \\ \dot{y} &= U \sin(\psi) + w \sin(\psi_w) \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (4.9)$$

De la Figura 4.2 se puede observar que la tarea a desarrollar es que el vehículo siga una trayectoria deseada en presencia de corrientes submarinas. Note que dicha trayectoria se encuentra a un ángulo deseado ψ_d del eje x y el objetivo del control será entonces el de reducir el error y existente entre el vehículo y la trayectoria deseada. Por lo tanto, se realizará la síntesis de un algoritmo de control que sea capaz de adaptarse a los cambios producidos por perturbaciones externas. De esta manera las ecuaciones (4.9) pueden reescribirse en términos del rumbo deseado, por lo que se obtiene:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= U \cos(\psi - \psi_d) + w \cos(\psi_w - \psi_d) \\
\dot{y} &= U \sin(\psi - \psi_d) + w \sin(\psi_w - \psi_d) \\
\dot{\psi} &= r
\end{aligned} \tag{4.10}$$

De la Figura 4.1, note que reducir el error y significa reducir la posición en el eje Y_I entonces haciendo un abuso de notación la ecuación se puede escribir de la siguiente manera,

$$\begin{aligned}
\dot{y} &= U \sin(\psi - \psi_d) + k_w \\
\dot{\psi} &= r \\
\dot{r} &= \tau_\psi
\end{aligned} \tag{4.11}$$

donde \dot{y} representa la velocidad a la cual el vehículo reduce la distancia hacia la trayectoria deseada, $k_w = w \sin(\psi_w - \psi_d)$ define la corriente que desplaza al vehículo en la dirección de \mathbf{y} . Dado que el vehículo se desplaza a baja velocidad y sin pérdida de generalidad la corriente se considere cuasi constante y que no cambia de dirección. En este problema solo abordaremos el estudio de las corrientes laterales.

En lo subsecuente se desarrollará una ley de control tipo *backstepping* paso a paso para resolver el problema de seguimiento y estabilizar el sistema (4.11).

Primero se define el error que corresponde a la distancia a minimizar entre la trayectoria deseada y la trayectoria actual del vehículo como,

$$e_1 = y - y_{\min} \tag{4.12}$$

En este caso $y_{\min} \neq 0$ cuando es necesario para estabilizar el vehículo y navegar a una distancia constante en referencia a la trayectoria deseada, entonces la derivada del error se puede escribir de la siguiente manera.

$$\dot{e}_1 = U \sin(\psi - \psi_d) + k_w \tag{4.13}$$

Con la finalidad de minimizar el error e_1 se propone la siguiente función positiva.

$$V_{L_1} = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (4.14)$$

Derivando la ecuación anterior al tiempo.

$$\dot{V}_{L_1} = e_1 [U \sin(\psi - \psi_d) + k_\omega] \quad (4.15)$$

Definimos un segundo error como,

$$e_2 = U \sin(\psi - \psi_d) - U \sin(\psi^v - \psi_d) \quad (4.16)$$

Donde la segunda ecuación del error contiene una entrada virtual de control ψ^v de la forma,

$$U \sin(\psi^v - \psi_d) = -c_1 e_1 - \hat{k}_\omega \quad (4.17)$$

En la ecuación anterior, \hat{k}_ω es un estimado de k_ω y $c_1 > 0$ es una constante. Reescribiendo (4.16) se tiene,

$$e_2 = U \sin(\psi - \psi_d) + c_1 e_1 + \hat{k}_\omega \quad (4.18)$$

De igual manera la ecuación (4.13) se reescribe como

$$\dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1 + \tilde{k}_\omega \quad (4.19)$$

donde, $\tilde{k}_\omega = k_\omega - \hat{k}_\omega$. Entonces, la ecuación (4.15) se puede escribir como,

$$\dot{V}_{L_1} = -c_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_1 \tilde{k}_\omega \quad (4.20)$$

Note de la ecuación anterior que si $\hat{k}_\omega \rightarrow k_\omega$ y $e_2 \rightarrow 0$ entonces $\dot{V}_{L_1} \leq 0$ y esto implica que $e_1 \rightarrow 0$

Para converger $\tilde{k}_\omega \rightarrow 0$, proponemos la siguiente función definida positiva

$$V_{L_2} = \frac{1}{2\gamma} \tilde{k}_\omega^2 \quad (4.21)$$

Donde $\gamma > 0$ es una ganancia de adaptación constante, entonces

$$\dot{V}_{L_2} = -\frac{\dot{\hat{k}}_w}{\gamma} \tilde{k}_w \quad (4.22)$$

Se define la siguiente función de ajuste

$$\tau_1 = \gamma e_1 \quad (4.23)$$

Entonces

$$\dot{V}_{L_1} + \dot{V}_{L_2} = -c_1 e_1^2 + e_1 e_2 + \left(\tau_1 - \dot{\hat{k}}_w \right) \frac{\tilde{k}_w}{\gamma} \quad (4.24)$$

De (4.18), se sigue

$$\dot{e}_2 = Ur \cos(\psi - \psi_d) + c_1 e_2 - c_1^2 e_1 + c_1 \tilde{k}_w + \dot{\hat{k}}_w \quad (4.25)$$

$$V_{L_3} = \frac{1}{2} e_2^2 \quad (4.26)$$

Derivando con respecto al tiempo,

$$\dot{V}_{L_3} = e_2 [Ur \cos(\psi - \psi_d) + c_1 e_2 - c_1^2 e_1 + c_1 \tilde{k}_w + \dot{\hat{k}}_w] \quad (4.27)$$

Para reducir el error de adaptación, introduciremos una segunda función de ajuste de la forma

$$\tau_2 = \tau_1 + \gamma c_1 e_2 \quad (4.28)$$

Definimos ahora, una tercer función de error

$$e_3 = Ur \cos(\psi - \psi_d) - Ur^v \cos(\psi - \psi_d) \quad (4.29)$$

El termino r^v representa una entrada virtual de control y esta dada por

$$Ur^v \cos(\psi - \psi_d) = -e_2(c_1 + c_2) - e_1(1 - c_1^2) - \tau_2 \quad (4.30)$$

Entonces, e_3 se expresa como

$$e_3 = Ur \cos(\psi - \psi_d) + e_2(c_1 + c_2) + e_1(1 - c_1^2) + \tau_2 \quad (4.31)$$

Reescribiendo (4.25) en terminos de e_3

$$\dot{e}_2 = e_3 - c_2 e_2 - e_1 + c_1 \tilde{k}_w + \dot{\hat{k}}_w - \tau_2 \quad (4.32)$$

Por lo tanto \dot{V}_{L_3} se expresa como

$$\dot{V}_{L_3} = -c_2 e_2^2 - e_1 e_2 + e_2 e_3 + e_2 (c_1 \tilde{k}_w + \dot{k}_w - \tau_2) \quad (4.33)$$

y

$$\dot{V}_{L_1} + \dot{V}_{L_2} + \dot{V}_{L_3} = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_2 e_3 + e_2 (\dot{k}_w - \tau_2) + \frac{\tilde{k}_w}{\gamma} (\tau_2 - \dot{k}_w) \quad (4.34)$$

La derivada de e_3 con respecto al tiempo se expresa como

$$\dot{e}_3 = Uc\tau_\psi \cos(\psi - \psi_d) - Ur^2 \sin(\psi - \psi_d) + L_1 e_1 + L_2 e_2 + L_3 e_3 + L_4 \tilde{k}_w + L_3 \dot{k}_w \quad (4.35)$$

donde

$$L_1 = -c_1 (3\gamma + 2 + \gamma^2 - c_1^2) - c_2 (1 + \gamma), \quad (4.36)$$

$$L_2 = -c_1 [c_1 (1 + \gamma + \gamma^2) + c_2 (1 + 2\gamma)] + 1 + \gamma - c_2^2, \quad (4.37)$$

$$L_3 = c_1 + c_2 + \gamma c_1, \quad (4.38)$$

$$L_4 = c_1 (\gamma c_1 + c_2) + 1 + \gamma. \quad (4.39)$$

Se propone la siguiente función

$$V_{L_4} = \frac{1}{2} e_3^2 \quad (4.40)$$

Su derivada se puede expresar como

$$\dot{V}_{L_4} = e_3 (Uc\tau_\psi \cos(\psi - \psi_d) - Ur^2 \sin(\psi - \psi_d) + L_1 e_1 + L_2 e_2 + L_3 e_3 + L_4 \tilde{k}_w + L_3 \dot{k}_w) \quad (4.41)$$

Finalmente, definimos la función de Lyapunov como

$$V_L = V_{L_1} + V_{L_2} + V_{L_3} + V_{L_4} = \frac{1}{2} \left(e_1^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{k}_w^2 + e_2^2 + e_3^2 \right) \quad (4.42)$$

Por lo tanto, derivando con respecto al tiempo, se tiene

$$\begin{aligned} \dot{V}_L = & -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + \frac{\tilde{k}_w}{\gamma} (\tau_2 + \gamma L_4 e_3 - \dot{k}_w) + e_2 (\dot{k}_w - \tau_2) \\ & + e_3 [Uc\tau_\psi \cos(\psi - \psi_d) - Ur^2 \sin(\psi - \psi_d) + L_1 e_1 + (1 + L_2) e_2 + L_3 e_3 + L_3 \dot{k}_w] \end{aligned} \quad (4.43)$$

Para reducir el error adaptable, por lo tanto introducimos una tercera función de ajuste.

$$\tau_3 = \tau_2 + \gamma L_4 e_3 \quad (4.44)$$

Observe que

$$\dot{\hat{k}}_w - \tau_2 = \dot{\hat{k}}_w - \tau_3 + \tau_3 - \tau_2 = \dot{\hat{k}}_w - \tau_3 + \gamma L_4 e_3 \quad (4.45)$$

Entonces, (4.43) se convierte

$$\begin{aligned} \dot{V}_L = & -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 + e_2(\dot{\hat{k}}_w - \tau_3) + \frac{\tilde{\hat{k}}_w}{\gamma}(\tau_3 - \dot{\hat{k}}_w) \\ & + e_3[Uc\tau_\psi \cos(\psi - \psi_d) - Ur^2 \sin(\psi - \psi_d) + L_1 e_1 + (1 + L_2 + \gamma L_4)e_2 + L_3 e_3 + L_3 \dot{\hat{k}}_w] \end{aligned} \quad (4.46)$$

Se propone el siguiente controlador

$$c\tau_\psi = r^2 \tan(\psi - \psi_d) - \frac{L_5 e_1 + L_6 e_2 + L_7 e_3}{U \cos(\psi - \psi_d)} \quad (4.47)$$

Por lo tanto la ley actualizada

$$\dot{\hat{k}}_w = \tau_3 \quad (4.48)$$

En consecuencia (4.46)

$$\dot{V}_L = -c_1 e_1^2 - c_2 e_2^2 - c_3 e_3^2 \quad (4.49)$$

donde

$$L_5 = L_1 + \gamma L_3 \quad (4.50)$$

$$L_6 = 1 + L_2 + \gamma c_1 L_3 + \gamma L_4 \quad (4.51)$$

$$L_7 = c_3 + L_3 + \gamma L_3 L_4 \quad (4.52)$$

La representación del sistema de error puede ser representado como sigue

$$\dot{e}_1 = -c_1 e_1 + e_2 + \tilde{\hat{k}}_w \quad (4.53)$$

$$\dot{e}_2 = -e_1 - c_2 e_2 + (1 + \gamma L_4)e_3 + c_1 \tilde{\hat{k}}_w \quad (4.54)$$

$$\dot{e}_3 = -(1 + \gamma L_4)e_2 - c_3 e_3 + L_4 \tilde{\hat{k}}_w \quad (4.55)$$

$$\dot{\tilde{\hat{k}}}_w = -\gamma e_1 - \gamma c_1 e_2 - \gamma L_4 e_3 \quad (4.56)$$

Reescribiendo (4.47) y (4.48) en términos de y, ψ, r se obtiene

$$c\tau_\psi = \tan(\psi - \psi_d)(r^2 - L_8) - L_7r - \frac{L_9y + L_8\hat{k}_w}{U \cos(\psi - \psi_d)} \quad (4.57)$$

con

$$\hat{k}_w = \gamma(L_{10}y + L_{11}\hat{k}_w + L_{11}U \sin(\psi - \psi_d) + L_4Ur \cos(\psi - \psi_d)) \quad (4.58)$$

donde

$$L_8 = L_6 + L_7L_3 \quad (4.59)$$

$$L_9 = L_5 + c_1L_6 + L_7(1 + \gamma + c_1c_2 + c_1^2\gamma) \quad (4.60)$$

$$L_{10} = 1 + L_4(1 - c_1^2 + \gamma) + c_1L_{11} \quad (4.61)$$

$$L_{11} = c_1 + L_3L_4 \quad (4.62)$$

4.1.1. Análisis de estabilidad

Note que la estabilidad global del punto de equilibrio $(e_i, \tilde{k}_w = 0)$ seguido de (4.42) y (4.56), implica que $V_L \leq 0$ y por el teorema LaSalle-Yoshizawa [56], tenemos que e_i y \hat{k}_w esta acotadas y $e_i, \tilde{k}_w \rightarrow 0$ tanto como $t \rightarrow \infty$, con $i = 1, 2, 3$. De (4.12), se sigue que $y \rightarrow y_{min}$. La vecindad de ψ se sigue de la vecindad definida por e_1, \hat{k}_w y e_2 definida en (4.18). Observe que la convergencia a cero de e_i no implica la convergencia a cero de ψ . De (4.18) podemos notar que ψ esta acotada, *i.e.*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi = \arcsin\left(-\frac{\hat{k}_w}{U}\right) + \psi_d \quad (4.63)$$

Observe que de (4.23), (4.28), (4.44), (4.48) y (4.56) se sigue que $\dot{\hat{k}}_w, \tau_i \rightarrow 0; i = 1, 2, 3$. (4.31) implica que $r \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$. Finalmente de (4.47), concluimos que el control τ_ψ es también acotado.

El principio de invarianza de LaSalle [56] establece que el estado (e_i, \tilde{k}_w) converge a el conjunto invariante mas grande M que esta contenido en $\{(e_1, e_2, e_3, \tilde{k}_w \in \mathbb{R}^4 | \dot{V}_L = 0\}$. En este conjunto invariante, tenemos que $e \equiv 0$ y que $\dot{e} \equiv 0$. De (4.48) tenemos que $\dot{\hat{k}}_w = 0$

y $\tilde{k}_w = 0$. Entonces, el conjunto invariante más grande será definido por,

$$M = \{(e, \tilde{k}_w) \in \mathbb{R}^4 | e = 0, \tilde{k}_w = 0\} \quad (4.64)$$

$$= \{(y, \psi, r, \hat{k}_w) \in \mathbb{R}^4 | (y, \psi, r, \hat{k}_w) = (0, \arcsin(-\frac{k_w}{U}) + \psi_d, 0, k_w)\} \quad (4.65)$$

El conjunto M es el punto simple $y = 0$, $\psi = \arcsin(-\frac{\hat{k}_w}{U})$, $r = 0$, $\hat{k}_w = k_w$ la cual es global asintóticamente estable. Para un sistema con perturbación es importante estimar la región de atracción de sus puntos de equilibrio. La ecuación (4.18) puede ser reescrita como,

$$e_2 = U \sin(\psi - \psi_d) + e_1 + (\hat{k}_w - k_w) + k_w \quad (4.66)$$

entonces

$$|U \sin(\psi - \psi_d)| \leq |e_2| + |e_1| + |\tilde{k}_w| + |k_w| \quad (4.67)$$

De las funciones de Lyapunov propuestas podemos escribir las siguientes desigualdades

$$\frac{1}{2}e_1^2 \leq V_L \leq U(0) \implies |e_1| \leq \sqrt{2U(0)} \quad (4.68)$$

$$\frac{1}{2}e_2^2 \leq V_L \leq U(0) \implies |e_2| \leq \sqrt{2U(0)} \quad (4.69)$$

$$\frac{1}{2}\tilde{k}_w^2 \leq V_L \leq U(0) \implies |\tilde{k}_w| \leq \sqrt{2U(0)} \quad (4.70)$$

Utilizando la ecuación anterior y la ecuación (4.67) podemos escribir

$$|\sin(\psi - \psi_d)| \leq \frac{3\sqrt{2U(0)}}{U} + \frac{|k_w|}{U} \quad (4.71)$$

Para remover las singularidades imponemos $|\sin(\psi - \psi_d)| < 1$. Por lo tanto, la región de atracción es: $\frac{|k_w|}{U} < 1 - \epsilon$, donde $\epsilon = 3\sqrt{2U(0)}$

4.2. Resultados en simulación

En la Figura 4.3 se muestra la trayectoria deseada y la trayectoria seguida por el vehículo en presencia de perturbación constante, las condiciones para esta simulación son: velocidad crucero $U = 0.75m/s$, magnitud de la corriente submarina $w = .1m/s$.

Como podemos observar el vehículo tiene pequeñas desviaciones al momento de cambiar de rumbo, lo cual era esperado ya que el medio de navegación es un medio no ideal (agua salada).

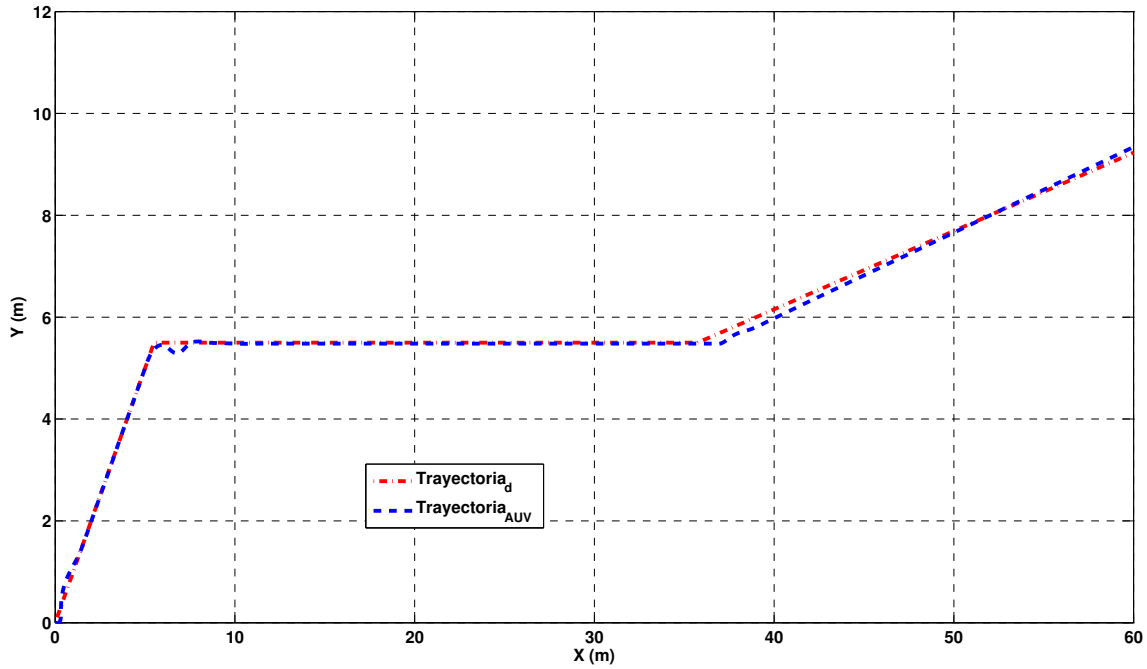


Figura 4.3: Trayectoria del vehículo en el plano xy

Para poder mantener la trayectoria del vehículo, este debe mantener un ángulo de deslizamiento constante, en la Figura 4.4, podemos observar que el ángulo de deslizamiento es paralelo al ángulo deseado pero la distancia entre ellos jamás es cero, es el caso de cuando se navega en presencia de corriente marina.

Como se puede observar en la Figura 4.4 cada vez que el vehículo cambia de trayectoria existe una oscilación antes de poder alcanzar la trayectoria deseada, este efecto lo podemos ver con más claridad en la estimación de la perturbación, en la Figura 4.5

En la Figura 4.6 podemos observar como el error sobre el eje y está acotado y además converge a cero

La entrada de control aplicada al vehículo es mostrada en la Figura 4.7, podemos ver que la entrada de control es exigida principalmente cuando existe un cambio de rumbo.

4.3. Discusión

- ◇ En este capítulo presentamos una ley de control basada en la técnica de *backstepping*.
- ◇ Al aplicarlo en simulación a vehículos submarinos aun cuando se asume los valores conocidos el ajuste de ganancias es una tarea difícil.

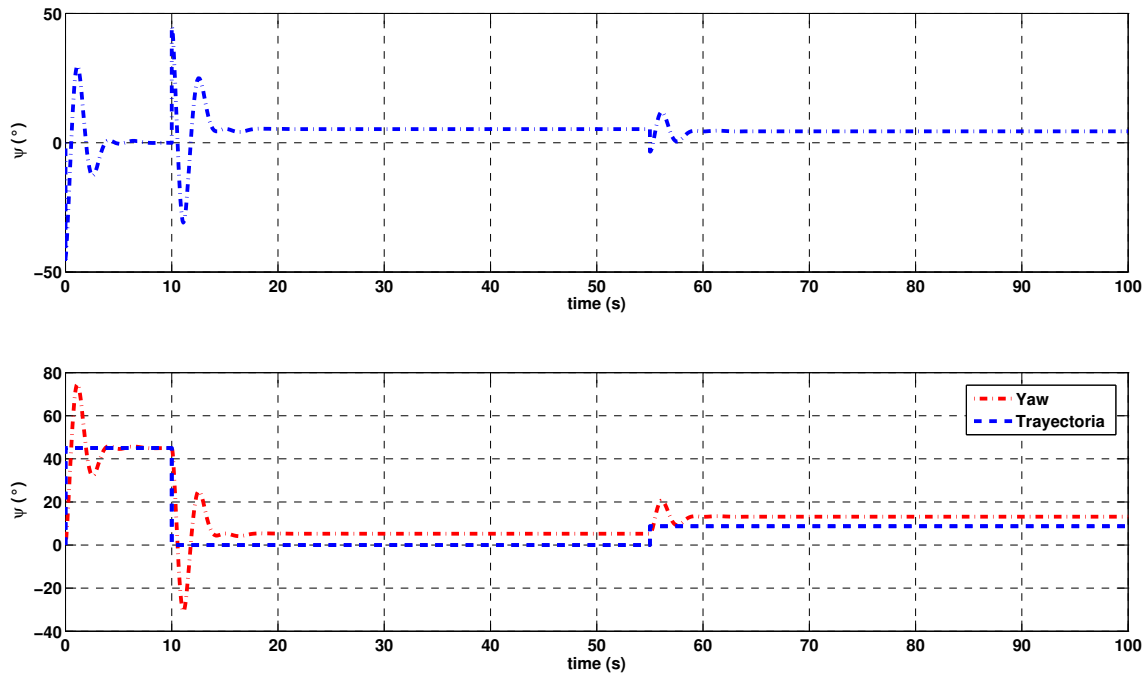


Figura 4.4: Marcos de navegación en presencia de corriente submarina

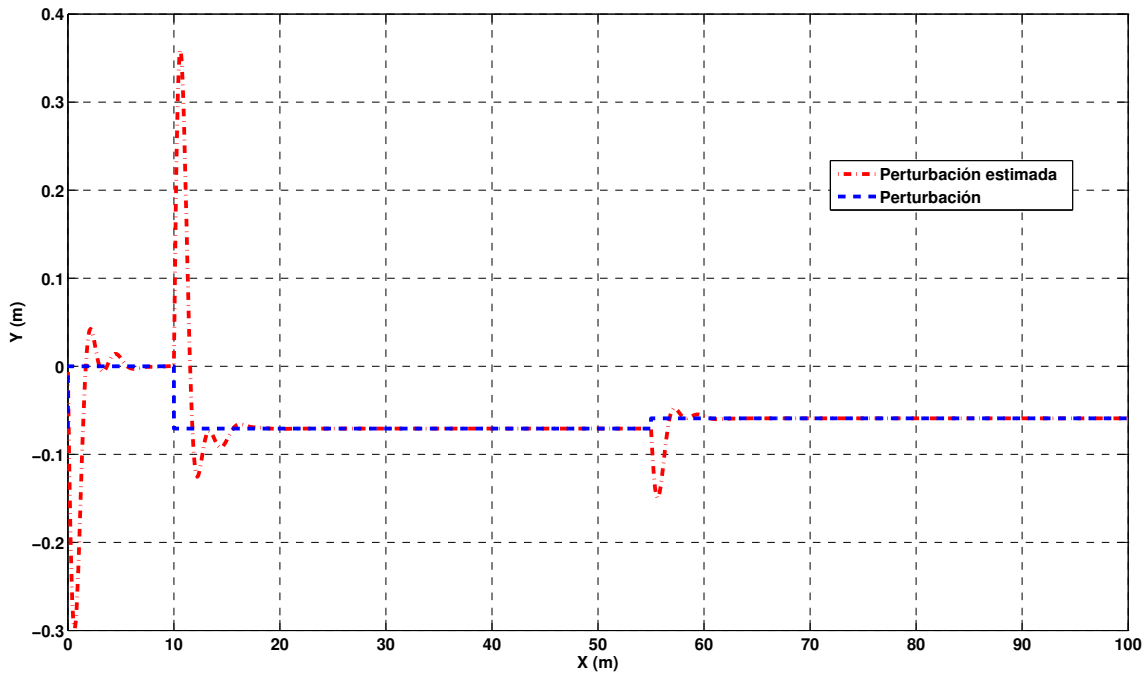


Figura 4.5: Perturbación simulada *vs* perturbación estimada

- ◇ De experiencias en aplicación practicas podemos concluir que los controles que se desarrollan a nivel teórico son validos para una región muy cercana al punto de equilibrio, ya que en el caso de las aplicaciones practicas, las limitaciones son por lo

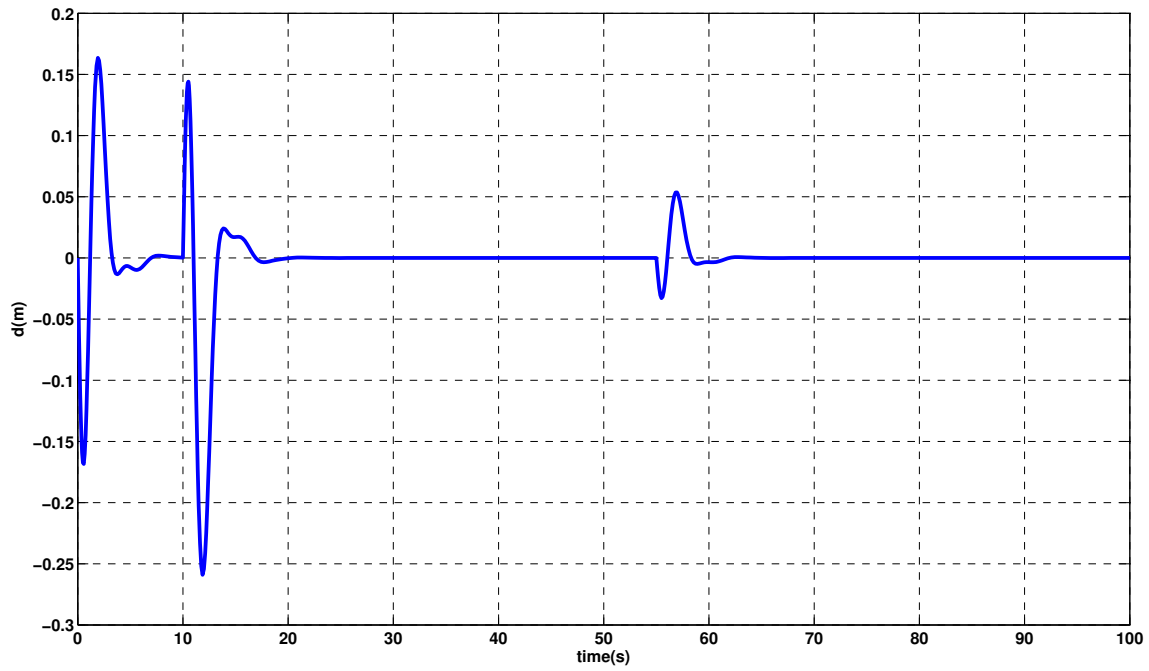
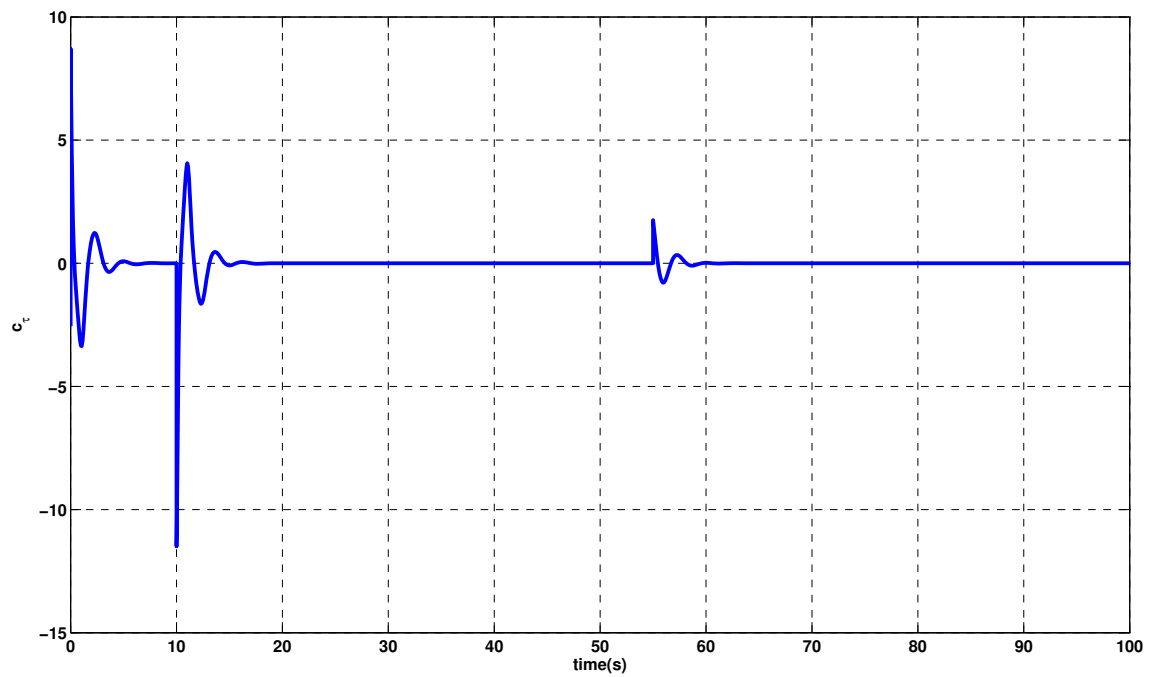
Figura 4.6: Error de seguimiento sobre el eje u 

Figura 4.7: Entrada de control

general debido a la potencia o fuerza que pueden desarrollar los actuadores.

Prototipos

Este trabajo se basa en la concepción y la validación de leyes de control para *AUVs*, razón por la cual se diseñaron y construyeron diferentes prototipos de vehículos submarinos que permitieron implementar y validar los algoritmos propuestos en tiempo real. En este capítulo abordaremos aspectos de la arquitectura interna, configuraciones de *AUVs*, sensores y actuadores que se emplearon y que además son básicos para realizar la navegación autónoma de estos submarinos. También describiremos de factores claves que se deben tomar en cuenta el diseño y desarrollo de vehículos submarinos autónomos.

5.1. Electrónica embebida

En los vehículos submarinos autónomos es importante la distribución de la comunicación entre sensores, actuadores y la computadora de a bordo, ya que esto determinará la velocidad con la cual la computadora de a bordo adquirirá la información proveniente de los sensores; datos que después procesará y enviará a los actuadores las acciones de control para mantener el vehículo estabilizado sea cual sea la misión deseada (estacionario, seguimiento de trayectoria, etc). De acuerdo con los prototipos existentes en la literatura (y que se han estudiado) se presenta en la Figura 5.1, una arquitectura general que engloba los mas comunes elementos que un *AUV* podría contener.

5.1.1. Procesamiento embebido

Sin lugar a dudas la unidad de procesamiento embebido es la parte más importante de cualquier vehículo (semi) autónomo, ya que es ahí donde se realiza la adquisición, filtrado,

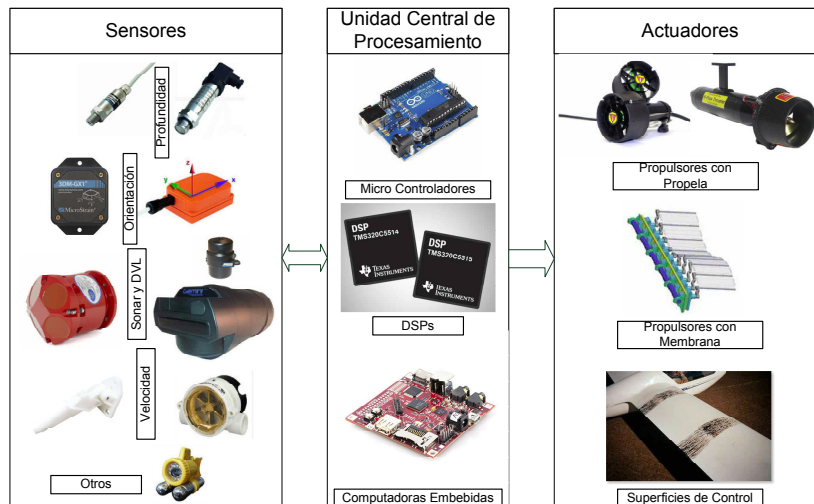


Figura 5.1: Arquitectura general de los AUVs

calculo de las acciones de control, y se manda la señal de actuación. Este procesamiento puede realizarse desde en un micro controlador hasta una computadora embebida. La evolución de procesadores en años recientes ha experimentado un incremento en la cantidad de líneas de código y calculo de la velocidad en el ciclo. De esta manera en la actualidad, se puede procesar video y calcular un algoritmo de control todo en un procesador de muy bajo costo. La Figura 5.2 muestra una tendencia creciente desde los 70's de estos procesadores.

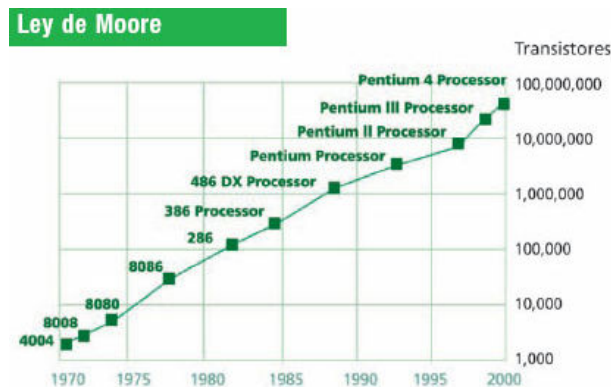


Figura 5.2: Tendencias en procesadores

5.1.2. Sensores

En un vehículo autónomo (submarino, aéreo o terrestre) es de gran importancia contar con los sensores adecuados, ya que estos son el equivalente a nuestros ojos, oídos y piel. En el caso de un vehículo autónomo los sensores le permiten de interactuar con su medio y le permiten llevar acabo las tareas que le han sido programadas. Dependiendo de la tareas a realizar será el sensor que se utilizará. En el mercado se pueden encontrar sensores desde costos muy bajos, los cuales por lo general incluyen mucho ruido en su medición y proporcionan el resultado crudo sin procesamiento, hasta los sensores más caros que en su forma básica proporcionan poco ruido de medición y como salida, la variable filtrada y procesada tal que se puede considerar una medición de alta precisión.

5.1.2.1. Profundidad

Tener una medición de la profundidad a la que se encuentra el AUV es de gran importancia, debido a que uno de los factores que mas puede contribuir con daños al vehículo es la presión submarina. Estos danos generalmente son representados como una deformación que sufre el fuselaje. Esta deformación puede caer en la zona no elastica del material tal que el vehículo pierda su flotabilidad original o inclusive fracturarlo provocando que el vehículo se inunde de agua. Los sensores de profundidad en su idea básica lo que miden es la columna de agua que se encuentran por encima del vehículo sumergido, es decir, la presión hidrostática.

5.1.2.2. Orientación espacial y magnética

Cuando un vehículo autónomo está navegando es importante que pueda determinar si va subiendo o bajando, si esta girando en sentido de las manecillas del reloj o en contra, su rumbo con respecto al polo magnético, etc. Un sensor capaz de proporcionarnos esta información es conocido como sistema de navegación inercial (*INS*) que consta básicamente de una central de medición inercial (*IMU*). Una *IMU* cuenta con acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, existen en el mercado gran cantidad de *IMUs*, que van desde los cientos hasta los miles de pesos, todo dependerá de la precisión en la medición que proporcionen. Las *IMUs* pueden ser divididas por su tipo de tecnología de medición,

esto es, giroscopios de fibra de óptica (*FOG*), giroscopio de anillo laser (*RLG*) y las más comunes las de sistema micro-electromecánico (*MEMS*) [67].

FOG: sensa el cambio en la orientación, su principio de operación es basado en la interferencia de luz que pasa a través de un núcleo de fibra óptica la cual puede llegar a tener una longitud de 5 km. Esto lo hace un giroscopio ideal para trabajar cerca de los polos magnéticos de la tierra, ya que la medición no es sensible al campo magnético de la tierra.

RLG: consiste en un anillo láser que tiene dos contra-propagación modos sobre la misma ruta de acceso con el fin de detectar la rotación. Su operación se basa sobre el principio del efecto *Sagnac* que desplaza los valores nulos del patrón de onda estacionaria interna en respuesta a la rotación angular. La interferencia entre los haces de contra-propagación, observada externamente, refleja los cambios en ese patrón de onda estacionaria, y por tanto de rotación.

MEMS: estos sistemas hacen uso de tecnología electromecánica micrométrica y nanométrica. Esto es, sistemas mecánicos como por ejemplo el giroscopio ha sido reducido a escala micrométrica tal que ocupe el volumen de un circuito integrado y pueda medir inclinación, caso similar es el del acelerómetro.

A continuación en la Tabla 5.1 se listan las *IMUs* más comerciales ordenadas en costo de mayor a menor, además se enuncian algunas de sus características principales.

Cabe mencionar que no son todas las marcas, tampoco todos los modelos disponibles y mucho menos las más caras o más baratas, solo se listan algunas de las *IMUs* más utilizadas en proyectos de investigación universitarios.

5.1.2.3. Sonar

Lograr evadir objetos u obstáculos es una de las características que debe poseer un AUV cuando navega en ambientes naturales u hostiles. Contar con un sonar le permite conocer si hay un objeto enfrente, a un lado o en el fondo, más aun con algunos se puede conocer la forma de un objeto e inclusive hacer medición de velocidad. Este tipo de sensor

Mod.	Fabricante	Gyro		Acel.		Mag.	Tec	GPS	Peso(g)	Costo(\$)
		#	Rango (Deg/s)	#	Rango (g's)					
IMU700CB	Crossbow	3	200	3	4		FOG		1600	12000
HG1700	Honeywell	3	1000	3	50		RLG		900	9000
MIDG	Microbotics	3	300	3	10	3	MEMS	X	55	7000
MTi-G-700 GPS/INS	Xsens	3	450	3	5	3	MEMS	X	55	4000
MTi-300 AHRS	Xsens	3	450	3	5	3	MEMS		52	3000
3DM-GX3-35	MicroStrain	3		3		3	MEMS			3000
VN-200	Vectornav	3	2000	3	16	3	MEMS	X	3	500
CHR-6um6	CH Robotics	3	2000	3	16	3	MEMS		20	200
9DOF Razor IMU	Sparkfun	3	2000	3	16	3	MEMS		8	125

Tabla 5.1: Centrales inerciales y sistemas de navegación mas comerciales

son los más confiables en cuanto detección se refiere ya que utilizan sonido para poder hacer la medición.

5.1.2.4. Velocidad

A diferencia de los vehículos aéreos, los vehículos submarinos carecen de los beneficios de la señal *GPS*, la cual es utilizada en algoritmos de fusión de datos en conjunto con el tubo Pitot, para determinar la posición y la velocidad del vehículo aéreo. Sin embargo, de igual manera a los *AUVs* se les puede agregar un tubo Pitot el cual tiene buena precisión en mediciones de velocidad de rango medio. Uno de sus inconvenientes es que la medición es afectada por la turbulencia, las corrientes en contra del desplazamiento y las burbujas con lo cual su precisión decrece. La Figura 5.3a muestra este sensor. De igual manera, este sensor es afectado por la temperatura y la densidad del agua, fenómeno antes mencionado como termoclina. Sumado a lo anterior, algunos errores se presentan en la medición cuando el vehículo esta cambiando el rumbo, es decir cuando su trayectoria no es recta. Por lo anterior antes mencionado, el tubo de Pitot pierde mucha precisión lo cual lo hace un sensor no adecuado para la medición de la velocidad de un *AUV*.

Una variante de costo similar es el sensor de flujo de tipo rueda, ver figura 5.3b. A diferencia del tubo de pitot, este dispositivo no es afectado por la turbulencia además que la influencia de la temperatura y densidad del agua no es un factor que afecte su medición. La medición se puede considerar buena siempre y cuando el vehículo viaje a baja velocidad, aunque, su precisión debido al ruido del sensor es baja. Lo cual lo cataloga como un sensor no adecuado para navegación de crucero.

Una alternativa a los dos anteriores es el sensor electromagnético el cual es efectivo desde muy bajas hasta altas velocidades (Fig. 5.3c), es altamente preciso, no es afectado por cambios de temperatura o de densidad, pero es afectado por la turbulencia y vortices que se generan alrededor de él. Además que tiene problemas cuando el vehículo cambia de rumbo, por lo que el sensor electromagnético no es un sensor adecuado para navegación tipo crucero y cambios de profundidades. En esta misma categoría caen los sensores tipo térmico y por diferencial de presión.

El sensor de efecto Doppler para velocidad (*DVL*), ver Fig. 5.3d, tiene un rango efectivo que va desde las velocidades pequeñas hasta altas, es robusto ante turbulencia y cambios de temperatura, inclusive es capaz de corregir aunque este navegando con corriente en contra, además carece de error en la medición aun cuando el vehículo cambia de rumbo. Puede medir contra agua o el fondo marino alternativamente, el inconveniente de este sensor es su alto costo, con cifras de entre los \$15 hasta los \$100 mil dólares.

5.1.2.5. Biológicos

Los procesos biológicos en los ambientes acuáticos suelen estar íntimamente relacionados con los procesos físicos y químicos, al mismo tiempo estos son afectados por la geología local, un ejemplo claro son los arrecifes. Cuando el equilibrio es afectado, el comportamiento de todo el ecosistema puede cambiar, estos cambios pueden llevar a la extinción de especies completas. Para poder ayudar a los científicos, que se encargan de preservar y estudiar estos ecosistemas, se han desarrollado sensores que por ejemplo miden la fluorescencia de la clorofila, como se comento en la sección 1.4.2 la luz a diferentes

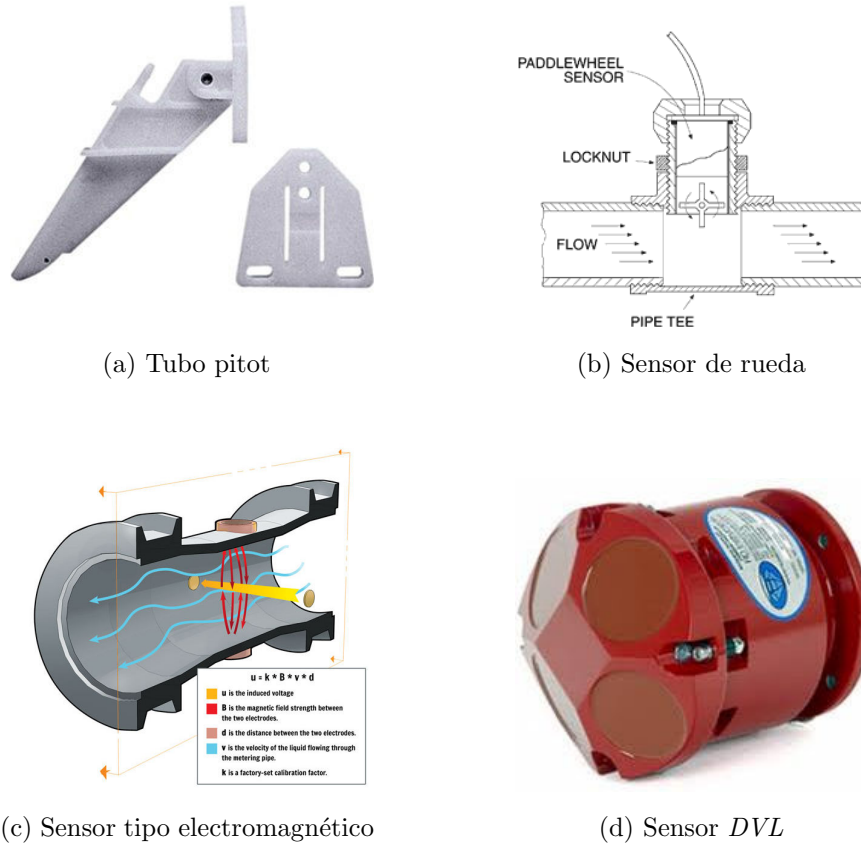


Figura 5.3: Sistemas de posicionamiento para vehículos submarinos

profundidades es absorbida y dada la importancia de esta para el desarrollo de las plantas se convierte en un parámetro importante para medir. Otro ejemplo de sensor son los que miden la abundancia del plancton, alimento básico de muchas especies marinas. También existen los que miden fotosintéticamente la radiación activa. Equipar un AUV con este tipo de sensor presentara diversas ventajas como el poder medir las variables en el lugar y muestrearlas durante largos periodos de tiempo, lo que no es posible hacer con un buzo, a esto le agregamos la alta maniobrabilidad y los rangos de profundidad a los cuales el submarino puede penetrar. Estos sensores pueden medir una gran variedad de parámetros biológicos en volúmenes relativamente grandes de agua con la mínima perturbación espacial o temporal al ambiente. A continuación se listan otros sensores de tipo químico y biológicos.

Biológicos: *Dual Light Sheet plankton counter (DLS)* utilizado para medir el plancton, *Shadowed Image Particle Profiling Evaluation Recorder (SIPPER)* que es otro sensor

para medir partículas.

Químicos: *Ultraviolet spectrophotometer for measurement of nitrate* sensor que mide la interacción ultravioleta, *Underwater Mass Spectrometer (UMS)* utilizado como espectrómetro de masas, *Spectrophotometric Elemental Analysis System (SEAS)*.

5.1.2.6. Otros

Sensores que miden la temperatura, típicamente se usan en combinación con los sensores biológicos y de profundidad. Cámaras son utilizadas para identificar formas, crear mapas del suelo marino, hacer seguimiento de patrones, entre otras aplicaciones. Recordar de la sección 1.4.2 que la luz es absorbida en un gran porcentaje en los primeros 10 metros, esta característica representa una desventaja clara cuando se quieren utilizar las cámaras como sensores, ya que implica utilizar fuentes de luz artificial. Los sensores de detección de iones utilizados para encontrar fuentes energéticas como gas y petróleo se encuentran en desarrollo, así como también sensores para determinar contaminantes en aguas oceánicas.

5.1.3. Actuadores

En secciones anteriores hemos visto las diferentes clases de sensores con las que puede estar equipado un *AUV*, pero ¿Qué es de un vehículo sino puede desplazarse eficientemente? La eficiencia de los desplazamientos dependerá de la aplicación y del tipo de propulsor que se utilice. La gama de propulsores con los que puede ser impulsado o hacer que cambie de rumbo un vehículo, se puede clasificar por el tipo de actuación que proporcionan, esto es:

- ◇ Propulsores con propelas
- ◇ Aletas o superficies de control
- ◇ Bio-inspirados

5.1.3.1. Propulsores con propela

Este tipo de propulsor es el más utilizado ya que son fáciles de implementar y su costo es el más bajo en comparación con las otras clases de propulsores. Esta clase de propulsores se puede encontrar en dos diferentes modelos: el propulsor de propela abierta (Fig. 5.4) y el propulsor con propela dentro de túnel (Fig. 5.5). En la Tabla 5.2 se muestra un comparativo de las características más importantes de los propulsores de propela.



Figura 5.4: Abierta



Figura 5.5: Túnel

Figura 5.6: Tipos de propulsor con propela

	Propela Abierta	Propela en Túnel
Eficiencia	Buena - Muy buena	Baja
Costo ¹	Bajo, desde \$500	Alto, desde \$2000
Fuerza / Potencia	Desde 30 N/80W	Desde 12N/100W
Tamaño, Long. / Diam.	Desde: 160 mm / 70 mm	Desde: 51 mm / 72 mm

Tabla 5.2: Comparación de características principales en propulsores de propela

5.1.3.2. Superficies de control

Este tipo de actuador es utilizado principalmente en vehículos tipo deslizador (*glider*), ver Figura 5.7. Estos vehículos son llamados así ya que estos se “deslizan” a través del agua para poder realizar las misiones. Por lo regular este tipo de vehículos son usados en misiones de larga duración y las cuales no requieren cambios abruptos en el rumbo del vehículo.

Figura 5.7: *Glider*

5.1.3.3. Bio-inspirados

Como se citó en la sección 1.2.1.1 son muchos los institutos y centros de investigación que llevan acabo investigación en el área de *AUVs*, muchos de esos institutos se han inspirado en la naturaleza para poder desarrollar la configuración de sus prototipos. La idea principal es de tener una especie de “simbiosis” con el entorno a fin de no estresar a las especies marinas y por consecuencia tener mejores resultados de las investigaciones. Por ejemplo en [60] y [71] se aborda el uso de un servomecanismo que emula la propulsión del cefalópodo, este tipo de propulsión provee poca maniobrabilidad, pero garantiza bajo consumo de energía. El actuador consiste en una cavidad pequeña con una pared móvil que succiona y expulsa agua por un orificio, el movimiento repetitivo genera un vórtice el cual es utilizado para desplazar el vehículo en sentido contrario a la expulsión del agua. Un resultado similar emulando a las medusas, salpas y calamares se presenta en [91], una vez más recurren a la generación de vortices pero en esta ocasión la pared móvil es una membrana elastica. La *Delft University of Technology*, en colaboración con la *Wageningen University*, diseñaron, construyeron y probaron un *AUV* bio-inspirado de nombre *Galatea* [84]. Este prototipo cuenta con un par de aletas ondulatorias inspiradas en la miliobatiformes, comparado con los sistemas de propulsión convencionales este sistema es más silencioso y estable, lo que le permitiría interactuar con peces sin perturbarlos. La Escuela Politécnica Federal de Zúrich diseñó y construyó un vehículo tipo tortuga como proyecto de estudiantes de ingeniería mecánica, ver [85], el proyecto se encuentra en la segunda fase de desarrollo pero ya es motivo de muchas publicaciones, ver Figura 5.8. Más información acerca de proyectos bio-inspirados pueden encontrarse en [72], [79], [102].

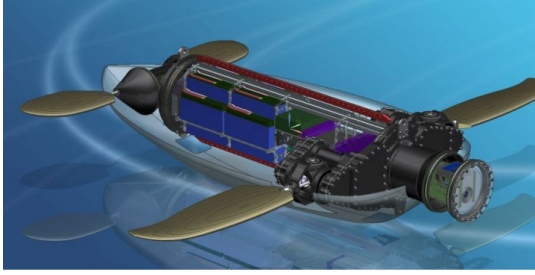
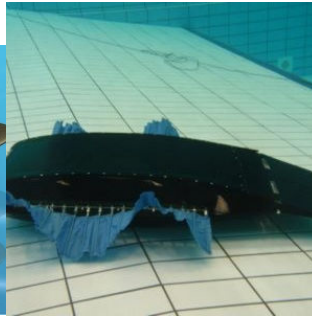
Figura 5.8: *Naro*Figura 5.9: *Galatea*

Figura 5.10: Ejemplo de vehículos bio-inspirados

5.1.4. Comunicaciones

Como se ha mencionado anteriormente, los *AUVs* para poder navegar de manera autónoma necesitan sensores a bordo y actuadores, estos impulsaran el vehículo a fin de seguir la trayectoria deseada o alcanzar el punto deseado. También necesitará de sistemas que le permitan conocer su posición con respecto a ciertos puntos de interés o bien llegar a ciertos puntos con referencia global. En algunos casos, estos vehículos deben poder transmitir su posición, orientación y datos al exterior, en muchos de los casos barcos base. Es por esto que los protocolos de comunicación y los sistemas de comunicación subacuáticos son un punto medular de cualquier *AUV*. En esta sección describiremos de manera muy general los que existen y son más utilizados con la finalidad de las comunicaciones.

5.1.4.1. Comunicación interna

Para realizar la comunicación interna entre sensores, actuadores y computadora embebida es necesario hacer uso de canales de comunicación, comúnmente conocido como *bus*. En la actualidad existen varias opciones, estos canales pueden ser clasificados en dos grupos:

Serial: En este los datos son enviados, bit a bit y se reconstruyen por medio de registros o rutinas de software. Está formado por pocos conductores y su ancho de banda depende de la frecuencia. Es usado desde hace menos de 10 años en *buses* para discos duros, unidades de estado sólido, tarjetas de expansión y para el *bus* del

procesador. Muchos sensores y controladores de actuadores cuentan con este tipo de canal de comunicaciones y son muy utilizados en robótica móvil, ejemplos son: I^2C , SATA, SPI, etc. Así mismo, protocolos para red serial son utilizados para administrar a alto nivel el sistema completo, ejemplo de estos son: CAN Bus, USB, EIA-485, etc.

Paralelo: Es un *bus* en el cual los datos son enviados por bytes al mismo tiempo, con la ayuda de varias líneas que tienen funciones fijas. La cantidad de datos enviada es bastante grande con una frecuencia moderada y es igual al ancho de los datos por la frecuencia de funcionamiento. En los computadores ha sido usado de manera intensiva desde el bus del procesador, los buses de discos duros, tarjetas de expansión y de vídeo, hasta las impresoras. Este tipo de bus, no es muy utilizado en robótica móvil.

5.1.4.2. Comunicación externa: acústica y posicionamiento submarino

La navegación del *AUV* estará asegurada siempre que cuente con buenos algoritmos de control, navegación, sensores y referencias al exterior. El vehículo hará uso de la acústica no solo para emplear las referencias externas que le permitan la navegación como *GIB* (GPS Intelligent Buoys, por su siglas en inglés), sino también para comunicarse con otros vehículos: barcos, *AUVs*, *ROVs*, etc. haciendo uso de modems acústicos. Como se mencionó en la sección 2.3, cuando se describe la posición de un objeto/vehículo en el espacio, este posicionamiento debe hacerse con respecto a marcos o posiciones bien conocidas. En posicionamiento acústico no es la excepción.

La posición se conocerá a través de un dispositivo de guiado/seguimiento acústico a un arreglo de transductores (formados en un patrón bien conocido). La distancia entre las líneas de base acústicos se utiliza generalmente para definir un sistema de posicionamiento acústico, esto define la distancia entre los elementos activos de detección. Los tres tipos principales de sistemas de posicionamiento acústicos son listados a continuación:

Línea base de ultra corta distancia (USBL) Figura 5.11a. Este tipo de posicionamiento esta embarcado en un solo punto del barco aunque físicamente consiste en varios transductores, este mide la diferencia de fase de llegada del sonido *ping* de

muchos elementos transductores (≥ 3) a uno solo. Esta comparación de fase es usada para determinar el rumbo desde el transceptor USBL hacia un punto.

Ventajas:

- ◇ La baja complejidad hace el USBL una herramienta fácil de usar.
- ◇ Sistema base en el barco, no es necesario lanzar un arreglo de transponders al suelo marino.
- ◇ Se necesita solo un receptor en la superficie
- ◇ Buen rango de precisión

Desventajas:

- ◇ Una calibración detallada debe ser realizada.
- ◇ La precisión absoluta depende de sensores adicionales.
- ◇ Redundancia minima
- ◇ Se requieren muchos receptores con alto grado de repetibilidad

Linea base de corta distancia (SBL) Figura 5.11b. Este tipo de sistema esta normalmente montado en un barco u objeto fijo del barco el cual es utilizado como marco de referencia. Normalmente consiste de un arreglo de mínimo 3 (típicamente 4) transductores acústicos arreglados en triángulo o rectángulo. La distancia entre los transductores (the “*baseline*”) se trata de hacer lo más espaciado posible como las limitaciones físicas de espacio lo permiten. Habitualmente la distancia entre ellos es de 10 m de largo.

Ventajas:

- ◇ La baja complejidad hace el USBL una herramienta fácil de usar.
- ◇ Buena velocidad de actualización de la posición cuando se usa una fuente de emisión sonora (*pinger*).

- ◇ Buen rango de precisión.
- ◇ Redundancia espacial.
- ◇ Sistema base en el barco, no es necesario lanzar un arreglo de transponders al suelo marino.

Desventajas:

- ◇ En aguas profundas ($> 30m$) es necesaria distancias de separación entre transductores para obtener buena precisión.
- ◇ Una calibración detallada debe ser realizada.
- ◇ La precisión absoluta depende de sensores adicionales.
- ◇ Muchos transductores son necesarios mas de 3.

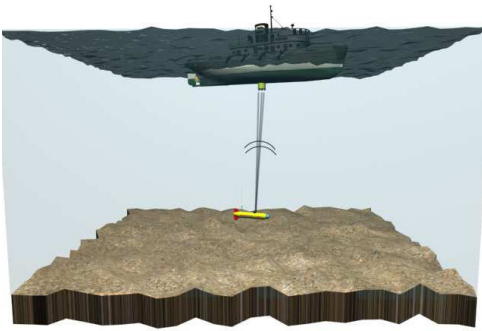
Linea base de larga distancia (LBL) Figura 5.11c. Este tipo de sistema obtiene su posición con respecto a un arreglo de transponders lanzados en arreglo tipo red. La posición es generada a partir del uso de 3 o más tiempos de vuelo desde/hacia la estación base marina (“rango/rango”).

Ventajas:

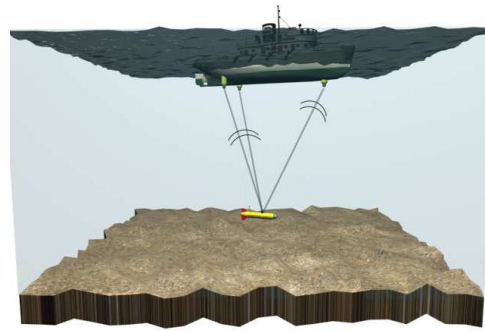
- ◇ Muy buena estimación de la posición independiente de la profundidad.
- ◇ Redundancia.
- ◇ Puede proveer una relativa precisión en la posición sobre áreas muy grandes.
- ◇ No necesita un *VRU* or giroscopios.
- ◇ Transductores pequeños.

Desventajas:

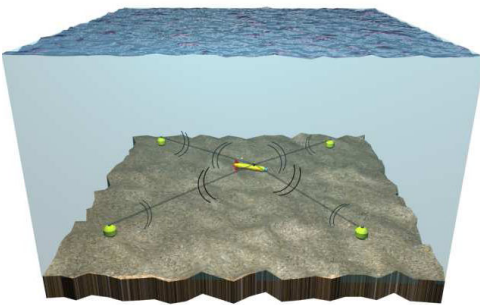
- ◇ Sistema complejo, require la operación de expertos del área.
- ◇ Grandes arreglos de equipo de alto costo.



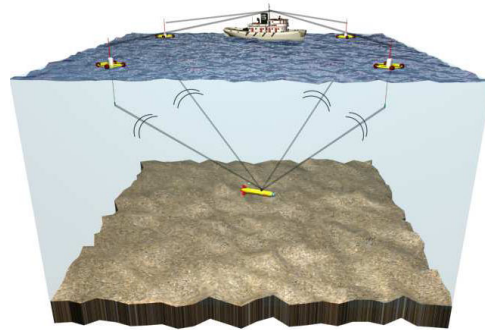
(a) USBL



(b) SBL



(c) LBL



(d) GIB

Figura 5.11: Sistemas de posicionamiento para vehículos submarinos

- ◇ Mucho tiempo operacional para ponerlos en marcha (lanzamiento/recuperación).
- ◇ Sistemas convencionales requieren calibración cada que se lanzan/plantan al suelo marino.

GPS con boyas inteligentes y sistemas combinados (GIB) Figura 5.11d. Estos sistemas combinan los beneficios de todos los sistemas descritos anteriormente, proporcionando mayor precisión en las mediciones y más redundancia. Claro está que la combinación trae beneficios pero también el sistema se vuelve más complejo de instalar.

Usualmente la selección de la banda de frecuencia está relacionada con la precisión requerida, a continuación se listan ejemplos de aplicación.

LF: Operaciones a cualquier profundidad oceánica.

	Rango de Frecuencia	Distancia Máxima ²
Frecuencia baja(LF)	8 a 16 kHz	>10 km
Frecuencia media (MF)	18 a 36 kHz	2 a 3.5 km
Frecuencia alta (HF)	30 a 60 kHz	1500 m
Frecuencia extra alta (EHF)	50 a 110 kHz	<1000 m
Frecuencia muy alta (VHF)	200 a 300 kHz	<100m

Tabla 5.3: Bandas de frecuencia y rangos máximos de operación para posicionamiento submarino

MF: Problemas con distancias más allá de 3,500 m.

EHF: Problemas con distancias más allá de 800 y hasta 1,000 m.

VHF: Problemas con distancias más allá de 100 m.

5.1.4.2.1. Modem acústico: Este dispositivo se utiliza para comunicación submarina, la distancia a la cual pueda transmitir la información dependerá de la banda de frecuencia seleccionada. Son equipos de consumo bajo de energía, además de transferir información también son utilizados para activar válvulas en pozo de exploración petrolera, mapeo oceanográfico, etc.

5.2. Fuselaje

El diseño del fuselaje en un vehículo submarino es un aspecto relevante ya que este determinará sus momentos de inercia, su masa agregada y su comportamiento hidrodinámico que dependiendo de la aplicación, puede ayudar a controlarlo o ser un factor para desestabilizarlo. Así mismo el tipo de material determinará, la flotabilidad y el peso, ya que no será lo mismo diseñarlo en aluminio que en acero inoxidable.

5.2.1. Aspectos Mecánicos

Otro aspecto que debe tomarse en cuenta al momento de diseñar un *AUV* es el material del fuselaje, porque del tipo de material dependerá su densidad que influirá en el

peso total del vehículo (alrededor de un 60 % del peso total), además de sus propiedades mecánicas como lo son: la resistencia mecánica, la conductividad térmica, la resistencia a la corrosión, las propiedades paramagnéticas, sólo por mencionar las más importantes. Cabe mencionar que todos los materiales elegidos son dieléctricos ya que los vehículos en su interior transportan circuitos eléctricos y electrónicos, además que su ambiente de trabajo es el agua. En la Tabla 5.4 se muestra una comparativa entre los materiales más usados en el diseño de fuselajes de vehículos submarinos autónomos.

	Propela Abierta	Propela en Túnel
Eficiencia	Buena - Muy buena	Baja
Costo ³	Bajo, desde \$500	Alto, desde \$2000
Fuerza / Potencia	Desde 30 N/80W	Desde 12N/100W
Tamaño, Long. / Diam.	Desde: 160 mm / 70 mm	Desde: 51 mm / 72 mm

Tabla 5.4: Características mecánicas de los materiales usados en fuselajes de *AUVs*

5.2.2. Aspectos Hidrodinámicos

La forma exterior del *AUV* definirá su hidrodinámica. No es lo mismo desplazar una esfera, un cilindro o una lamina en el agua debido al arrastre de agua que tiene por su forma. Despreciando el efecto de los vortices, son 3 los aspectos más importantes a considerar en la forma del vehículo y estos son: la masa agregada, la fuerza de arrastre (*Drag*) y la fuerza de levantamiento (*Lift*). Estas dos ultimas son las más importantes ya que definen en gran medida la velocidad crucero a la cual el vehículo puede navegar en forma controlada.

Hoy en día se han hecho investigaciones y aproximaciones matemáticas para determinar dependiendo de la forma: su masa agregada, el coeficiente de levantamiento y el coeficiente de arrastre. Al momento la forma más rápida para conocer los mencionados parámetros, es la estimación via soluciones de diseño asistido por computadora (*CAD*).

Este tipo de soluciones son paquetes de computadora que introduciendo el diseño

exterior, sus propiedades mecánicas, y algunos datos del entorno como son: densidad del fluido (en este caso densidad del agua), cara de incidencia del fluido sobre el vehículo, entre otras, permiten tener una aproximación bastante aceptable del coeficiente en cuestión. Las incertidumbres en estos parámetros del vehículo posteriormente pueden ser absorbidas por el control.

5.3. Energía para propulsión

Al momento una limitante de los *AUVs* es la energía con la que dispone para realizar una misión, ya que esta determina los minutos, horas e inclusive días que puede durar un vehículo cumpliendo con su tarea. Los esfuerzos en investigación se han orientado en almacenar mayor cantidad de energía en menor volumen, pero también en soluciones híbridas, es decir la combinación de baterías con generadores o celdas solares.

5.3.1. Baterías

En la actualidad son la fuente energética más utilizada. Las más destacadas por su uso, eficiencia y costo son: las baterías níquel-cadmio (*NiCd*), las de níquel e hidruro metálico (*NiMH*), las compuestas por iones litio (*Li-ion*), iones litio polímero (*LiPo*), etc. En la figura 5.12, se ilustra la densidad de energía en masa contra volumen. De la figura se puede observar por que son las baterías más utilizadas.

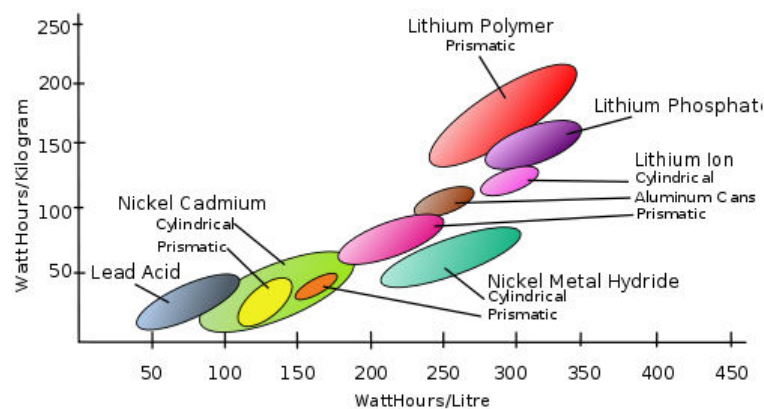


Figura 5.12: Baterías

5.3.2. Energías Limpias

Un tema en el cual un cierta cantidad de investigadores está dirigiendo sus esfuerzos es el de generar y almacenar energía en forma amigable con el ambiente, es decir, que no genere residuos tóxicos y/o que haga uso de energías renovables como el aire, el sol o las corrientes marinas. Así han aparecido en escena con buenos resultados a nivel prototipo las celdas de hidrógeno (celdas de combustible) y las celdas solares.

5.3.2.1. Celda de Hidrógeno

Inventadas en 1839 por el físico británico Sir William Grove. Es en los años 60's cuando la primera aplicación practica de la celda de hidrógeno tomo lugar en los proyectos *Gemini* y *Apollo* para aplicaciones espaciales. Su funcionamiento es muy similar a las baterías las cuales convierten la energía química en energía eléctrica, su principio es muy básico, en una celda generalmente de grafito se suministra un combustible, como el hidrógeno y un oxidante, en este caso el oxígeno, ver Figura 5.13. El producto final es agua, calor y lo más importante energía de corriente directa. Las celdas de combustible generalmente son clasificadas por el tipo de materiales la clase de electrólito utilizado en la reacción. A continuación se describen las más usuales: *proton exchange/polymer (PEMFCs)*, *direct methanol fuel cells (DMFC)*, *alkaline fuel cells (AFC)*, *phosphoric acid fuel cells (PAFC)*, *molten carbonate fuel cells (MCFC)*, *solid oxide fuel cells (SOFC)*, *zinc air fuel cells (ZAFC)* y *protonic ceramic fuel cells (PCFCs)*, de estas ultimas existen una gran variedad que dependen del rango de temperaturas de operación. Las más utilizadas son las celdas *PEMFCs*, las cuales poseen una temperatura baja de operación, son utilizadas en prototipos de vehículos terrestres y en algunas casas y oficinas.

Son pocos los *AUVs* que han utilizado este tipo de energía, el primero fue el denominado *Urashima* [34] [105], ver Figura 5.14, el cual fue desarrollado en 1998 y fue hasta el 2002 que completó su primera misión de 132.5 km haciendo uso de una batería Li-ion. En Junio de 2004 recorrió una distancia de 220 km frente a las costas de Suruga, Japón, haciendo uso de una celda de hidrógeno, la cual fue desarrollada por *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.*

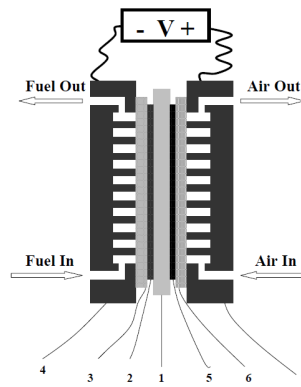


Figura 5.13: funcionamiento de un celda de hidrógeno

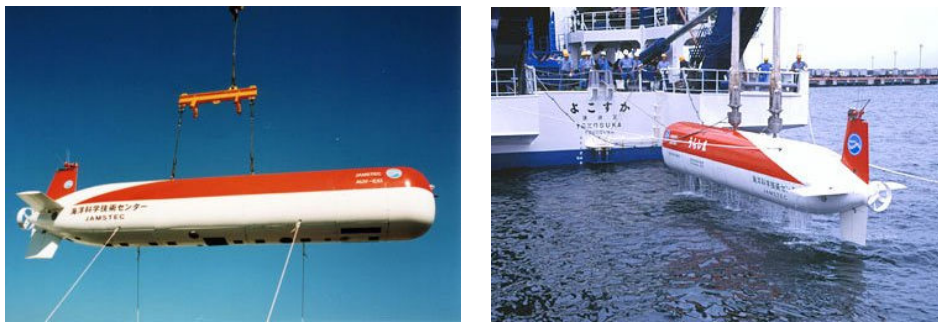


Figura 5.14: Vehículo Urashima propiedad de JAMSTEC

5.3.2.2. Celda Solar

Las celdas solares han sido utilizadas en una gran variedad de aplicaciones modernas. Hoy en día se conocen varias aplicaciones en las que figuran: recarga de bicicletas, vehículos eléctricos, teléfonos celulares, faros y boyas para navegación marítima, electrificación rural, edificios inteligentes, alumbrado en ciudades, teléfonos de emergencia en carretera, etc. Estas celdas solares han tenido tal éxito que muchos investigadores han realizado el esfuerzo para aplicarlas en los *AUVs*.

Su principio es muy simple (aunque desarrollarlas no tanto), los fotones provenientes de la radiación solar, impactan sobre una superficie plana conformada por materiales semiconductores sensibles a la luz, un ejemplo son: el silicio o el arseniuro de galio. Los fotones golpean a los electrones que forman parte del exterior de los átomos del material semiconductor, los cuales son liberados de los átomos a los que estaban originalmente confinados. Esta liberación los lleva a circular a través del material y producir electricidad.

En nuestros días son pocos los vehículos que han empleado este tipo de energía uno de los primeros, es el denominado *SAUV*, ver [51], [13], [49], [89], [12], [30], [55]

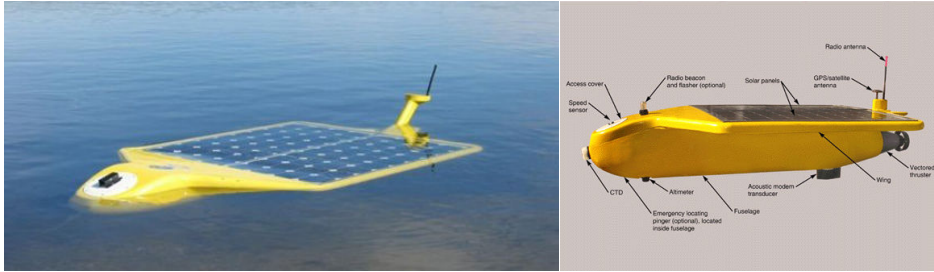


Figura 5.15: Vehículo *SAUV*, cooperación entre *AUSI* y *IMTP*

De los principales inconvenientes de este tipo de energía en aplicaciones, es que la potencia solar que requieren estas celdas no es suficiente cuando el vehículo se encuentra sumergido, y esto debido a la dispersión (ver sección 1.4.2) de energía que el vehículo realiza. Sin embargo, científicos del área continúan haciendo esfuerzos como los que se reportan en [54], [108] para mejorar este tipo de energía. Sin lugar a duda estos son los primeros pasos hacia un avance que cambiara el rumbo del consumo de energía de los *AUVs*.

5.3.2.3. Energía térmica y mareomotriz

La finalidad de hacer uso de las energías disponibles en el ambiente submarino es de proveer de más tiempo de autonomía a los *AUVs*, de este modo, se han aplicado de manera bastante exitosa el uso de las termoclinas y la fuerza de las olas para generar el movimiento de los *AUVs*, prueba de ello se puede encontrar en [14] [103] [43], [48], [59].

5.4. Sistemas Operativos

En definitiva el alma de los *AUVs* es su sistema operativo o software, también conocido como *Middleware*. Este es el encargado de administrar los recursos del sistema en tiempo real, de coleccionar los datos proveniente de los sensores, procesar la información a través de la ley de control programada y alternar los tiempos en el canal de comunicación interno y externo.

5.4.1. ROS - *Robot Operating System*

En este sentido las universidades y centros de investigación han desarrollado un papel muy importante diseñando sistemas operativos cada vez más rápidos, con mejor administración de recursos, poco consumo de hardware (como es el disco duro y la memoria) y optimización de ejecución de las tareas en el procesador. Un ejemplo es el conocido *Robot Operating System* (*ROS* por sus siglas en inglés). Este es un sistema operativo orientado a robótica, originalmente desarrollado bajo el nombre de *switchyard* en el laboratorio de inteligencia artificial de Stanford y como soporte al proyecto *STAIR* (*Stanford AI Robot*). A partir del 2008, el desarrollo de este quedó principalmente a cargo de *Willow Garage* [37], que es un laboratorio de investigación en robótica e incubador de tecnología dedicado a desarrollar hardware y software de distribución libre, con este instituto colaboran más de 20 instituciones entre universidades y laboratorios de investigación. Si bien es cierto que se puede ejecutar en diferentes distribuciones Linux como lo es: *Fedora*, *Debian*, *Arch Linux* e inclusive en *Mac* y *Windows*, también es cierto que la única que cuenta con soporte de ayuda es *Ubuntu*. *ROS* es un conjunto de librerías definidas para sensores y actuadores comerciales, en algunos casos contiene la librerías necesarias para controlar robots comerciales como lo son: *AscTec Quadrotor*, *Aldebaran Nao*, *Lego NXT*, *AMIGO*, *CoroWare Corobot*, *Cyton-Gamma*, ver Figura 5.16.

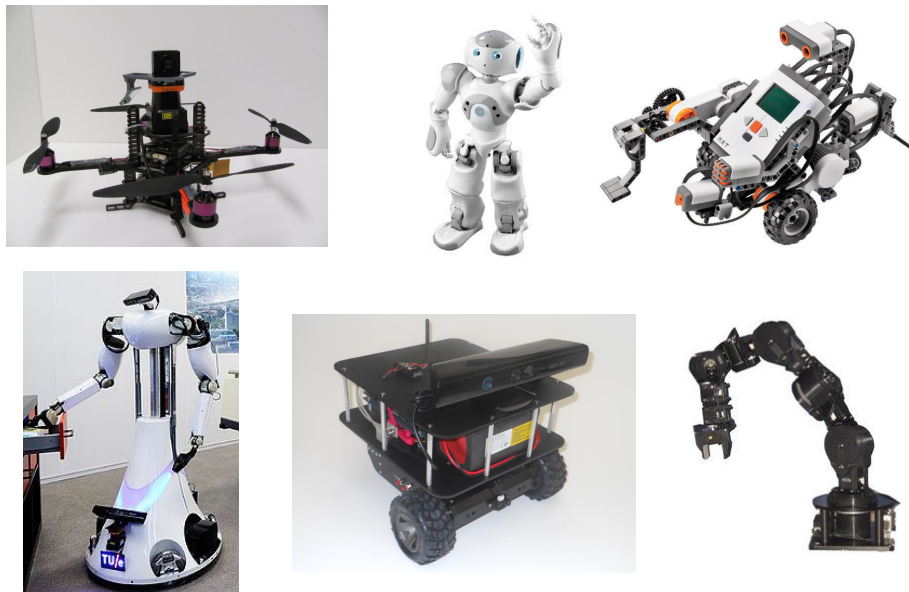


Figura 5.16: Robots que se pueden controlar con *ROS*

De las principales ventajas que ofrece este sistema operativo es que está orientado a robots móviles y además está optimizado para leer sensores y aplicar señal a los actuadores en los ciclos de reloj mínimos, pudiendo afirmar que se realiza un control en tiempo real. Cabe mencionar que este sistema no garantiza efectividad, si la ley de control embebida no está bien sintonizada o no es buena.

5.4.2. MOOS - *Mission Oriented Operating Suite*

MOOS es un conjunto de Operaciones Orientadas a Misiones. Originalmente utilizado por Bluefin Odyssey III, propiedad del Instituto Tecnológico de Massachusetts (*MIT*). Escrito por Paul Newman en el 2001 cuando realizaba estudios de post doctorado bajo la tutela de John Leonard y mismo año en el que él se integró al grupo de robótica móvil de la universidad de Oxford; desde entonces Newman ha seguido desarrollando y proporcionando mantenimiento a este software. MOOS fue desarrollado con el objetivo de apoyar las operaciones que se realizaban con los vehículos marinos autónomos del laboratorio Ingeniería Oceánica del MIT (*MIT Ocean Engineering*, por sus siglas en inglés) y dentro del programa *Sea Grant* propiedad del mismo instituto.

Actualmente MOOS se encuentra en desarrollo y mantenimiento por Newman en Oxford y es en el sitio de internet de esa universidad donde se puede obtener la versión más reciente del software [74]. Este software cuenta con una subversión que el MIT desarrolló y mantiene, MOOS-IvP [75], IvP abreviación de *Interval Programming* (Programación por Intervalo). El cual fue desarrollado en el 2004 para el control en vehículos autónomos de superficie, y poco tiempo después para vehículos submarinos, esta versión fue desarrollada por Mike Benjamin en sus estudios de post doctorado, otra vez bajo la tutela de John Leonard y también como trabajo de investigación para el Centro Naval de Guerra Submarina (*Naval Undersea Warfare Center*) en Newport Rhode Island.

5.4.3. Otros

Además de los dos anteriores existe una gran variedad y diversidad de sistemas operativos con aplicación en robótica móvil, hemos descrito más en detalle los dos anteriores

por ser en la actualidad los de más uso, pero no son los únicos, prueba de ello son: *NXJ*, una aplicación programada en JAVA para el robot de juguete *NXT robot kit*, *CLARATy*, que es un software de robótica desarrollado por *JPL* como parte del programa de exploración de Marte, también existe *Simbad 3d Robot Simulator* que es una aplicación JAVA que además que permite controlar al robot y simula el ambiente donde se ejecutará la tarea.

5.5. Prototipos desarrollados

Durante mis estudios de doctorado se construyeron en el equipo de submarinos de la *UMI-LAFMIA* al menos 6 diferentes configuraciones de *AUVs* de los cuales 3 son autoría principal del que suscribe este documento. Dichos prototipos se describen en las siguientes subsecciones.

5.5.1. Vehículo 4 – T^2

Denominado como 4 – T^2 por representar un juego de palabras de la frase “*Four Tilting Thrusters*”, cuatro propulsores pivotantes, ver Figura 5.5.1. Este es el primer vehículo desarrollado en toda la historia de la UMI. Fue utilizado para el trabajo de tesis de maestría de este autor pero siguió evolucionando y fue utilizado para hacer investigación básica en el tema de detección de fallas. En un principio los propulsores del vehículo podían pivotar en torno al eje que los mantenía unido al fuselaje del prototipo, después, se optó por mantenerlos fijos, ya que el mecanismo que los hacía pivotar se descomponía continuamente, por poseer mecanismos muy delicados. Debido a que el control de los propulsores y su pivoteo implicaba una dinámica acoplada para el control se decidió mantenerlos fijos y ver que sucedía al simular una falla súbita de alguna de los propulsores.

De las principales ventajas de este prototipo son: el bajo peso 3 kg aproximados, tamaño pequeño; longitud: 0.45 m, diámetro: 0.1 m, además de electrónica de muy bajo costo. Todo en conjunto lo hace un vehículo fácil de manipular y experimentar ya que no requiere de grandes espacios para probar algoritmos de control. Sin embargo está un

poco limitado ya que cuenta tan solo con una central inercial y sensor de presión, además de tener como procesador principal un micro controlador de la familia *Arduino Mega*, haciéndolo un vehículo con el que se pueden verificar sólo leyes de control simples, como son: backstepping, LQR, PID, Filtro de Kalman para 3 GDL, etc.

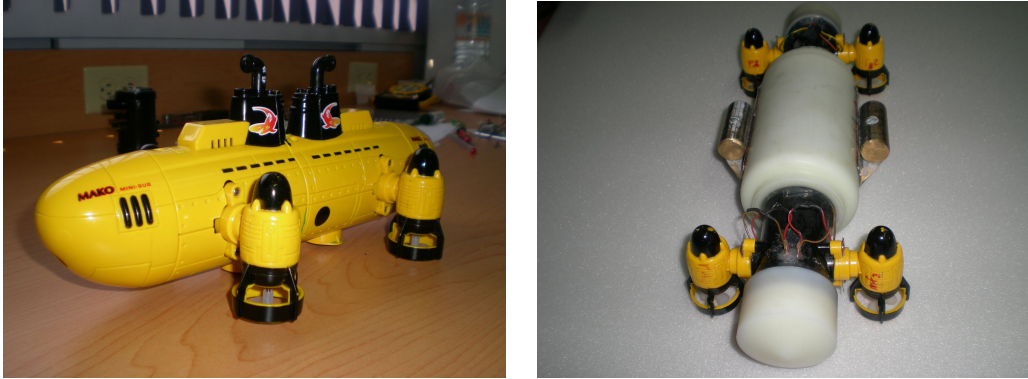


Figura 5.17: Vehículo 4 – T^2

5.5.2. OME-AUV

Este prototipo fue desarrollado en la *UMI-LAFMIA*, el primero en su tipo, y marco el inicio de los trabajos con *AUVs* empleando computadoras embebidas, su arquitectura es como la descrita en la figura 5.1. Este vehículo tiene como particularidad que posee "modularidad" ya que todos sus elementos se pueden intercambiar por otros de repuestos o añadir más sin hacer modificaciones de estructura mayor, es decir, cuenta con un módulo externo de baterías que en caso agotarse puede ser reemplazado sin necesidad de abrir otro módulo o el compartimiento principal. Es un vehículo tipo híbrido, ya que puede usarse como *AUV* o como *ROV*. Cuenta con un peso de 45 kg, su velocidad de avance hacia adelante es de 0.5 m/s y de inmersión de 0.3 m/s . También cuenta con un compartimiento de baterías que le da una autonomía de entre 40 a 60 minutos.

5.5.3. CHAAK-AUV

Vehículo que al igual que el descrito en la sección 5.5.2 . Fue concebido para probar algoritmos basados en análisis de intervalos, seguimiento o evasión de obstáculos haciendo uso de la visión artificial. A diferencia de *OME-AUV*, este es un vehículo 5 veces más ligero

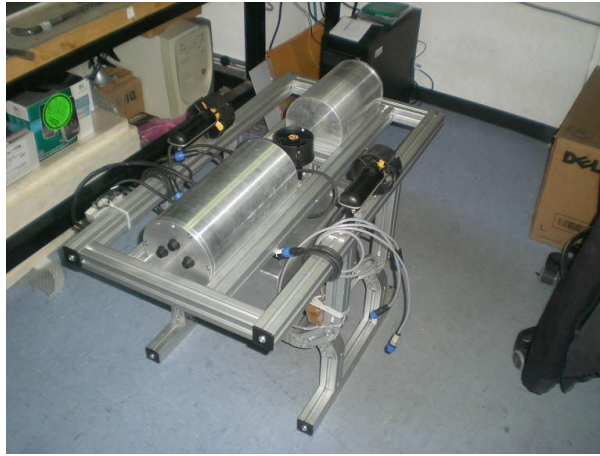


Figura 5.18: Vehículo OME-AUV

con menor consumo de energía. Cuenta con un sensor laser de la marca **Hokuyo**, el cual le permite determinar la distancia a objetos en línea recta que se encuentren a no más de 1 m. Su fuente de alimentación principal es un par de baterías LiPo a 11.5 voltios de corriente directa. Por su configuración el centro de masa está naturalmente estabilizado en *roll* y *pitch*, por el arreglo de sus propulsores pueden controlarse 4 GDL. Tiene una autonomía de 45 minutos en misión, haciendo uso del laser. Su velocidad máxima en línea recta de 0.5 m/s , una velocidad de rotación de $15^\circ/\text{s}$. Finalmente por el tipo de conectores a prueba de agua que posee, puede permanecer indefinidamente a una profundidad de 10 m o 24 horas a cerca de 100 m.

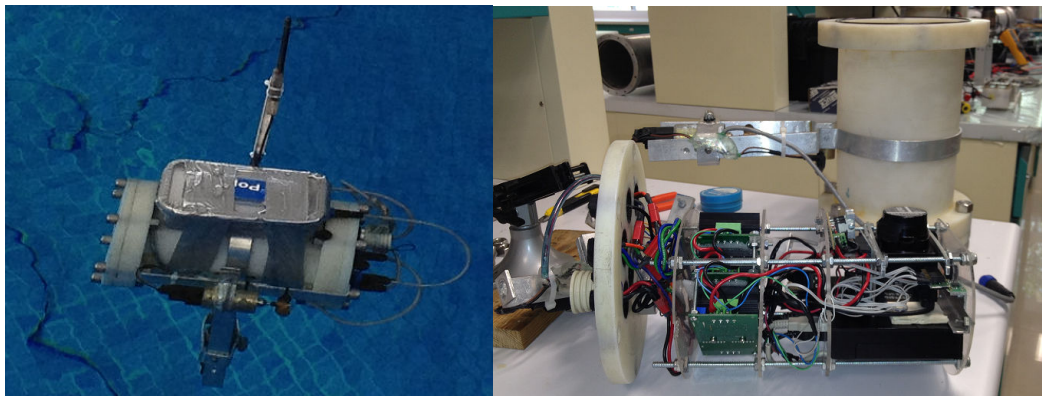


Figura 5.19: Vehículo Chaak

5.6. Otros prototipos

Todo este trabajo fue posible en gran medida a la cooperación que se logró con otros institutos, caso concreto de la Escuela Nacional Superior de Tecnologías Avanzadas (ENSTA “Ex-ENSIETA”, por sus siglas en francés) y la Compañía General de Geofísica (CGG). En los mencionados institutos pude interactuar y colaborar en el diseño y ensamble de los AUVs: SAUC’ISSE, Sardine y SAFRAN-Alpha.

5.6.1. SAUC’ISSE y Sardine

Vehículos propiedad de *ENSTA-Bretagne* que poseen una arquitectura como la descrita en la figura 5.1. *SAUCe Interval Super Submarine of Ensieta* (**SAUC’ISSE**, por sus siglas en inglés) es un vehículo más completo que **Sardine**, ver Figura 5.20. La diferencia radica en que el primero posee, una mejor computadora embebida, hidrófonos y sonar, haciéndolo un vehículo para experimentos más complejos. Este vehículo fue diseñado para probar algoritmos de localización haciendo uso de la técnica de intervalos, más información ver [62], [73].

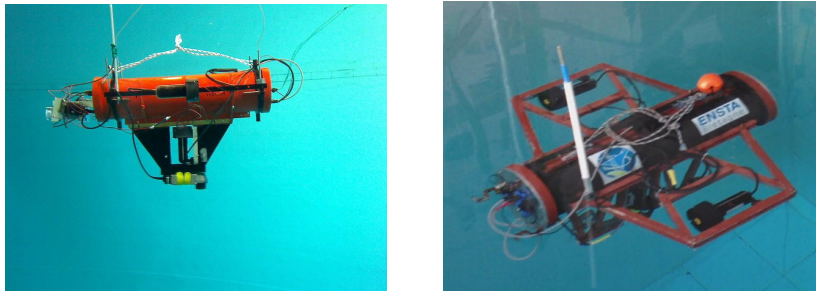


Figura 5.20: AUVs, SAUC’ISSE y Sardine

5.6.2. SAFRAN-Alpha

Vehículo propiedad de *CGG*, diseñado para hacer estudios en el área de geofísica, este vehículo cuenta con una arquitectura similar a la descrita en la Figura 5.1. Una de sus características principales es que su sistema operativo fue desarrollado haciendo uso de compilación cruzada base linux, lo cual lo hace un sistema dedicado al control en tiempo

real, otra característica es que es el primer prototipo que la compañía desarrolla con la finalidad de reproducirlo cientos de veces para hacer navegación coordinada de una flotilla de submarinos.



Figura 5.21: Vehículo Safran-Alpha

Conclusiones y trabajo futuro

Desarrollar leyes de control teóricas tiene un grado de dificultad bastante alto, pero si se combina con el hecho de que estas leyes se deben probar en un prototipo y no en un programa de computadora tiene un grado de dificultad diferente ya que en las aplicaciones físicas intervienen variables que en muchas ocasiones no son modeladas en la simulación. Por este motivo desarrollar un prototipo en el cual se prueben leyes de control no es sencillo, se requiere de mucha paciencia.

En vehículos submarinos a diferencia de los aéreos el medio en el que opera se puede considerar como una ayuda para el control ya que disipa muchos movimientos (fuerza de *damping*) ya que este es casi 1000 veces más denso que el aire. Por otra parte el sistema es estable en lazo abierto por sí mismo ya que sin necesidad de que se le aplique una señal de control el sistema alcanzará su punto de estabilidad a través del tiempo posiblemente tarde pero lo alcanzará. Obviamente esta afirmación es cierta cuando el vehículo no está en presencia de corrientes submarinas. El introducir una ley de control tiene como objetivo acelerar la respuesta del vehículo y alcanzar un punto deseado con mayor rapidez.

Pero así como la fuerza de *damping* es un beneficio para vehículos submarinos, las fuerzas hidrodinámicas producidas por el vehículo cuando este navega a una velocidad relativamente son un factor a considerar en el diseño. En muchos casos estas fuerzas son tan grandes que ni el mejor controlador jamás diseñado puede contrarrestar su efecto. La razón es simple, los actuadores o la misma electrónica limita la velocidad de respuesta del controlador ante esta clase de perturbaciones.

Trabajo futuro

- ◇ Modelar de forma numérica los efectos hidrodinámicos que desestabilizan a un vehículo submarino.
- ◇ Determinar con precisión el efecto de la masa agregada en vehículos submarinos de talla pequeña.
- ◇ Determinar los puntos de estabilidad de un vehículo en función de sus ángulos de ataque.
- ◇ Desarrollar leyes de control robusta a cambios paramétricos.
- ◇ Desarrollar leyes de control robusta ante corrientes con dirección y amplitud variable.

Bibliografía

- [1] P. Oliveira A. Alcocer and A. Pascoal. Study and implementation of an ekf gib-based underwater positioning system. *Control Engineering Practice*, 15(6):689 – 701, 2007.
- [2] A.P. Aguiar and A.M. Pascoal. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated auvs in the presence of ocean currents. In *Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on*, volume 2, pages 2105 – 2110 vol.2, dec. 2002.
- [3] Endra Joelianto Agus Budiyo, Bambang Riyanto. *Intelligent Unmanned Systems: Theory and Applications*. Springer, Berlin Heidelberg, first edition, 2009.
- [4] Y. Kim A.J. Healey. Control of small robotic vehicles in unexploded ordnance clearance. Albuquerque, Nuevo México, April 1997.
- [5] K. Alam, T. Ray, and S.G. Anavatti. Design of a toy submarine using underwater vehicle design optimization framework. In *Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems (CIVTS), 2011 IEEE Symposium on*, pages 23 –29, april 2011.
- [6] G. Antonelli, S. Chiaverini, N. Sarkar, and M. West. Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: experimental results on odin. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 9(5):756 –765, sep 2001.
- [7] Gianluca Antonelli. *Underwater Robots*. Springer, New York, second edition, 2006.
- [8] Underwater Robotics & Application. <http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/>.

-
- [9] R. Bachmayer, N.E. Leonard, J. Graver, E. Fiorelli, P. Bhatta, and D. Paley. Underwater gliders: recent developments and future applications. In *Underwater Technology, 2004. UT '04. 2004 International Symposium on*, pages 195 – 200, april 2004.
- [10] Dale Beswick. *Inertial Navigation System for an Autonomous Underwater Vehicle*. PhD thesis, The Australian National University, 1998.
- [11] M. Betke and L. Gurvits. Mobile robot localization using landmarks. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 13(2):251 –263, apr 1997.
- [12] D. Blidberg, S. Mupparapu, S. Chappell, R. Komerska, J.C. Jalbert, and Nitzelm R. The sauv ii (solar powered auv) test results 2004. In *Oceans 2005 - Europe*, volume 1, pages 545 – 550 Vol. 1, june 2005.
- [13] R. Blidberg, J. Jalbert, and M.D. Ageev. The ausi/imtp solar powered autonomous undersea vehicle. In *OCEANS '98 Conference Proceedings*, volume 1, pages 363 –368 vol.1, sep-1 oct 1998.
- [14] J. Borchsenius and S. Pinder. Underwater glider propulsion using chemical hydrides. In *OCEANS 2010 IEEE - Sydney*, pages 1 –8, may 2010.
- [15] P. Brown, D. Hardisty, and T.C.A. Molteno. Wave-powered small-scale generation systems for ocean exploration. In *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pages 1 –6, may 2006.
- [16] Inc. C & C Technologies. <http://www.cctechnol.com/site.php>.
- [17] A. Caiti, A. Garulli, F. Livide, and D. Prattichizzo. Localization of autonomous underwater vehicles by floating acoustic buoys: a set-membership approach. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 30(1):140 – 152, jan. 2005.
- [18] Ernesto Olguín Díaz y Michel Perrier Carlos Canudas de Wit. Nonlinear control of an underwater vehicle/manipulator with composite dynamics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, November 2000.

- [19] Yih-Lin Cheng and Jia-Hung Lai. Fabrication of meso-scale underwater vehicle components by rapid prototyping process. *Journal of Materials Processing Technology*, 201:640 – 644, 2008. 10th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies.
- [20] Jian-Ting Yang Chien-Hsing Lee and Joe-Air Jiang. Assessment of pem fuel cells-based dc/dc power conversion for applications in auvs. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 46(4):1834 –1847, oct. 2010.
- [21] S.K. Choi and J. Yuh. Design of advanced underwater robotic vehicle and graphic workstation. *Autonomous Systems Laboratory Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii*.
- [22] Tom Clancy and John Gresham. *Submarine: A Guided Tour Inside a Nuclear Warship*. Berkley Books, 1993.
- [23] B.T. Costic and D.M. Dawson. Quaternion-based adaptative attitude tracking controller without velocity measurements. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2001.
- [24] C.A. Cruz-Villar, V. Parra-Vega, and A. Rodriguez-Angeles. Project-oriented low cost autonomous underwater vehicle with servo-visual control for mechatronics curricula. *Autonomous Robots*, 2000.
- [25] X. Cufi, Ridao P., Puig J., and Garcia R. Augmented state kalman filtering for auv navigation. *International Conference on Robotics & Automation*, 2002.
- [26] Chris Gaskett David Wettergreen and Alex Zelinsky. Autonomous guidance and control for an underwater robotic vehicle. *Robotic Systems Laboratory Department of Systems Engineering, RSISE Australian National University Department of Systems Engineering, RSISE Australian National University*.
- [27] M. Di Marco, A. Garulli, S. Lacroix, and A. Vicino. Set membership localization and mapping for autonomous navigation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 11(7):709–734, 2001.

- [28] Olguin-Diaz E. *Modélisation et Commande d'un Systeme Vehicule/Manipulateur Sous-Marin*. PhD thesis, National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 1999.
- [29] O. Egeland and K.Y. Pettersen. Department of engineering cybernetics, norwegian university of science and technology. 2008.
- [30] C.C. Eriksen, T.J. Osse, R.D. Light, T. Wen, T.W. Lehman, P.L. Sabin, J.W. Ballard, and A.M. Chiodi. Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 26(4):424–436, oct 2001.
- [31] R.M. Eustice, O. Pizarro, and H. Singh. Visually augmented navigation for autonomous underwater vehicles. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 33(2):103–122, april 2008.
- [32] I. Fantoni and R. Lozano. *Nonlinear Control for Underactuated Mechanical Systems*. Springer-Verlag, 2002.
- [33] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). Proyecto urashima. <http://www.jamstec.go.jp/e/>. [Accesado 1-Nov-2010].
- [34] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. <http://www.jamstec.go.jp/e/>. [Accesado 15-May-2009].
- [35] Thor I. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley and Sons, Norway, second edition, 1999.
- [36] Thor I. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Ltd, London, first edition, 2011.
- [37] Willow Garage. Investigación y desarrollo de software y *Hardware* para robótica. <http://www.willowgarage.com/>. [Accesado 1-Nov-2010].
- [38] R. Garcia, J. Batlle, X. Cufi, and J. Amat. Positioning an underwater vehicle through image mosaicking. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2779–2784 vol.3, 2001.

- [39] A. Garulli and A. Vicino. Set membership localization of mobile robots via angle measurements. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 17(4):450 –463, aug 2001.
- [40] Stefano Chaiverini Gianluca Antonelli, Fabrizio Caccavale and Giuseppe Fusco. A novel adaptative control law for underwater vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, March 2003.
- [41] Stefano Chaiverini Gianluca Antonelli, Fabrizio Caccavale and Luigi Villani. An output feedback algorithm for position and attitude tracking control of underwater vehicles. December 1998.
- [42] Gwyn Griffiths. *Added Masses of Ship Structures*. Taylor & Francis, London & New York, first edition, 2003.
- [43] Zhigang He, Yanan Yang, Wendong Niu, Yanhui Wang, Hongwei Zhang, Yuhong Liu, and Zhiliang Wu. Component layout optimization of thermal engine used by underwater gliders. In *Oceans, 2012*, pages 1 –7, oct. 2012.
- [44] A.J. Healey, D.B. Marco, and R.B. McGhee. Autonomous underwater vehicle control coordination using a tri-level hybrid software architecture. In *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2149 –2159 vol.3, apr 1996.
- [45] S.K. Choi H.T. Choi, A. Hanai and J. Yuh. Development of an underwater robot, odin-iii. *IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003.
- [46] Woods Hole Oceanographic Institution. Deep submergence laboratory's (dsl). <http://www.whoi.edu/page.do?pid=23555>.
- [47] Alexander V. Inzartsev. *Underwater Vehicles*. In-Tech, Croatia, first edition, 2009.
- [48] Manley J. and S. Willcox. The wave glider: A new concept for deploying ocean instrumentation. *Instrumentation Measurement Magazine, IEEE*, 13(6):8 –13, december 2010.

-
- [49] Sherman J., R.E. Davis, W.B. Owens, and J. Valdes. The autonomous underwater glider "spray". *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 26(4):437–446, oct 2001.
- [50] Yuh J. Modeling and control of underwater robotic vehicles. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 20(6):1475–1483, nov/dec 1990.
- [51] J. Jalbert, J. Baker, J. Duchesney, P. Pietryka, W. Dalton, D.R. Blidberg, S. Chappell, R. Nitzel, and K. Holappa. A solar-powered autonomous underwater vehicle. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 2, pages 1132–1140 Vol.2, sept. 2003.
- [52] B. Jalving. The ndre-auv flight control system. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 19(4):497–501, oct 1994.
- [53] L. Jaulin. Range-only slam with occupancy maps: A set-membership approach. *Robotics, IEEE Transactions on*, 27(5):1004–1010, oct. 2011.
- [54] P. Jenkins, S. Messenger, K. Trautz, S. Maximenko, D. Goldstein, D. Scheiman, and R. Walters. High band gap solar cells for underwater photovoltaic applications. In *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, pages 002061–002064, june 2012.
- [55] M.A. Joordens. Design of a low cost underwater robotic research platform. In *System of Systems Engineering, 2008. SoSE '08. IEEE International Conference on*, pages 1–6, june 2008.
- [56] H.K. Khalil. *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, second edition, 1996.
- [57] Hayato Kondo and Tamaki Ura. Navigation of an auv for investigation of underwater structures. *Control Engineering Practice*, 12(12):1551–1559, 2004.
- [58] Alexandr I. Korotkin. *Added Masses of Ship Structures*. Springer, St. Petersburg, Russia, first edition, 2007.
- [59] N. Kraus and B. Bingham. Estimation of wave glider dynamics for precise positioning. In *OCEANS 2011*, pages 1–9, sept. 2011.

- [60] M. Krieg and K. Mohseni. Thrust characterization of a bioinspired vortex ring thruster for locomotion of underwater robots. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(2):123–132, April 2008.
- [61] Jaulin L. A nonlinear set membership approach for the localization and map building of underwater robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 25(1):88–98, feb. 2009.
- [62] O. Didrit L. Jaulin, M. Kieffer and E. Walter. *Applied Interval Analysis, with Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics*. Springer-Verlag, London, 2001.
- [63] Marine Systems Engineering Laboratory. <http://www.ausi.org/>.
- [64] Marine Systems Engineering Laboratory. <http://www.transit-port.net/Lists/AUVs.Org.html>.
- [65] H. Lamb. *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, London, 1932.
- [66] A.K. Lammas, K. Sammut, and F. He. Improving navigational accuracy for auvs using the mapr particle filter. In *OCEANS 2008*, pages 1–8, sept. 2008.
- [67] Anthony Lawrence. *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*. Springer (Mechanical Engineering Series), USA, second edition, 1998.
- [68] Pan-Mook Lee, Bong-Huan Jun, Kihun Kim, Jihong Lee, T. Aoki, and T. Hyakudome. Simulation of an inertial acoustic navigation system with range aiding for an autonomous underwater vehicle. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 32(2):327–345, april 2007.
- [69] J.J. Leonard and H.F. Durrant-Whyte. Mobile robot localization by tracking geometric beacons. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 7(3):376–382, jun 1991.
- [70] H.Q. Liu, M. Chitre, and Gao Rui. Auv positioning based on interactive multiple model. In *OCEANS 2010 IEEE - Sydney*, pages 1–6, may 2010.

- [71] Krieg M. and Mohseni K. Dynamic modeling and control of biologically inspired vortex ring thrusters for underwater robot locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(3):542 –554, june 2010.
- [72] S.G.K. Man, A.B. Phillips, S.W. Boyd, J.I.R. Blake, and G. Griffiths. Bio-inspired aquatic flight propulsion system for agile and manoeuvrable underwater vehicles. In *OCEANS, 2012 - Yeosu*, pages 1 –10, may 2012.
- [73] R. E. Moore. *Methods and Applications of Interval Analysis*. SIAM, Studies in Applied and Numerical Mathematics, Philadelphia, second edition, 1995.
- [74] MOOS. *Middleware*, orientado a vehículos marinos. <http://www.robots.ox.ac.uk/mobile/MOOS/wiki/pmwiki.php>. [Accesado 5-Sep-2012].
- [75] MOOS-IvP. *Middleware*, versión de moos con variaciones propuestas por el mit. <http://oceanai.mit.edu/moos-ivp/pmwiki/pmwiki.php>. [Accesado 5-Sep-2012].
- [76] E.M. Mouaddib and B. Marhic. Geometrical matching for mobile robot localization. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 16(5):542 –552, oct 2000.
- [77] K.Y. Pettersen O. Egeland.
- [78] California Institute of Technology. <http://www4.eng.hawaii.edu/asl/AboutASL.htm>.
- [79] California Institute of Technology. Proyecto de propulsion biológica. <http://dabiri.caltech.edu/>, 2003. [Accesado 18-Nov-2012].
- [80] California Institute of Technology. Proyecto de propulsion biológica. <http://users.cecs.anu.edu.au/kambara/>, 2003. [Accesado 18-Nov-2012].
- [81] California Institute of Technology. Proyecto de propulsion biológica. <http://dabiri.caltech.edu/>, 2003. [Accesado 18-Nov-2012].
- [82] California Institute of Technology. Proyecto de propulsion biológica. <http://www4.eng.hawaii.edu/~asl/Sauvim/>, 2003. [Accesado 18-Nov-2012].

- [83] California Institute of Technology. Proyecto de propulsion biológica. <http://users.cecs.anu.edu.au/serafina/>, 2003. [Accesado 18-Nov-2012].
- [84] Delft University of Technology. Proyecto galatea. <http://www.galatea-project.nl>, 2007. [Accesado 23-Dic-2012].
- [85] ETH Zurich. (Swiss Federal Institute of Technology). Proyecto naro. <http://www.naro.ethz.ch/p2/index.html>, 2008. [Accesado 18-Nov-2012].
- [86] Massachusetts Institute of Technology. Mit sea grants áuv lab. <http://auvlab.mit.edu/>, 1991.
- [87] C.F. Olson. Probabilistic self-localization for mobile robots. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 16(1):55–66, feb 2000.
- [88] A. Pascoal P. Oliveira. Navigation systems design: An application of multi-rate filtering theory. *Institute for Systems and Robotics and Department of Electrical Engineering*.
- [89] David A. Patch. A solar energy system for long-term deployment of auvs. In *International UUV SYMPOSIUM*, pages 363–368 vol.1, April 24-28 2000.
- [90] Tristan Perez. *Ship Motion Control*. Springer, London, first edition, 2005.
- [91] A.M. Polsenberg-Thomas, J. Burdick, and K. Mohseni. An experimental study of voice-coil driven synthetic jet propulsion for underwater vehicles. In *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pages 923–927 Vol. 1, 2005.
- [92] Z. Li R. Murray and S.Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.
- [93] Bluefin Robotics. <http://www.bluefinrobotics.com/>.
- [94] M.N. Sangekar, B. Thornton, T. Nakatani, and T. Ura. Development of a landing algorithm for autonomous underwater vehicles using laser profiling. In *OCEANS 2010 IEEE - Sydney*, pages 1–7, may 2010.

-
- [95] SNAME. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers (1950)*. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. In: Technical and Research Bulletin, 1-5.
- [96] K.T. Sutherland and W.B. Thompson. Localizing in unstructured environments: dealing with the errors. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 10(6):740–754, dec 1994.
- [97] T.J. Tarn and S.P. Yang. Modeling and control for underwater robotic manipulators - an example. In *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2166–2171 vol.3, apr 1997.
- [98] Andrew R. Teel. Global stabilization and restricted tracking for multiple integrators with bounded controls. *Systems & control letters*, 1992.
- [99] E. Low G. Seet S. Swee P.L. Cheng T.H. Koh, M. W. S. Lau. Development and improvement of an underactuated underwater robotic vehicle. *Robotic Research Centre and School of Mechanical & Production Engineering*.
- [100] David H. Titterton and John L. Weston. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. AIAA, USA, second edition, 2005.
- [101] K. Vickery. Acoustic positioning systems. a practical overview of current systems. In *Autonomous Underwater Vehicles, 1998. AUV'98. Proceedings of the 1998 Workshop on*, pages 5–17, aug 1998.
- [102] Christopher M. Watts. *A comparison study of biologically inspired propulsion systems for an autonomous underwater vehicle*. PhD thesis, University of Glasgow, 2009.
- [103] Simonetti P.J. Webb D.C. and Jones C.P. Slocum: an underwater glider propelled by environmental energy. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 26(4):447–452, oct 2001.

-
- [104] C.D. Williams. Auv systems research at the nrc-iot: an update. In *Underwater Technology, 2004. UT '04. 2004 International Symposium on*, pages 59 – 73, april 2004.
- [105] I. Yamamoto, T. Aoki, S. Tsukioka, H. Yoshida, T. Hyakudome, T. Sawa, S. Ishibashi, T. Inada, K. Yokoyama, T. Maeda, S. Ishiguro, H. Hirayama, K. Hirokawa, A. Hashimoto, N. Hisatome, and T. Tani. "fuel cell system of auv ürashima". In *OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, volume 3, pages 1732 – 1737 Vol.3, nov. 2004.
- [106] J. Yuh. Learning control for underwater robotic vehicles. *Control Systems, IEEE*, 14(2):39 –46, april 1994.
- [107] J. Yuh. Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Autonomous Robots*, 2000.
- [108] Yu Zhang and Peiwu Xu. Solar underwater glider of photovoltaic system research and design. In *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference on*, pages 5164 –5166, june 2010.
- [109] Dr. Uwe Zimmer. Sitio con información relativa a auvs. <http://www.transitport.net/Lists/AUVs.Org.html>. [Accesado desde el 1-Sep-2008].