

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Estrategia de control no convencional para un vehículo autónomo subacuático

Autor: Alexei Fernández Tkachova

Tutores: Ing. Yunier Valeriano Medina
Dr.C. Luis Hernández Santana

Santa Clara

2012

“Año 54 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Estrategia de control no convencional para un vehículo autónomo subacuático

Autor: Alexei Fernández Tkachova
email: aftkachova@uclv.edu.cu

Tutores: Ing. Yunier Valeriano Medina Prof. Instructor
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: yunierv@uclv.edu.cu

Dr.C. Luis Hernández Santana Prof. Titular
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: lhsantana@uclv.edu.cu

Santa Clara

2012

“Año 54 de la Revolución”



Hago constar que el presente TRABAJO DE DIPLOMA fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Alexei Fernández Tkachova
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Alexei Fernández Tkachova
Autor

Fecha

Boris Luis Martínez Jiménez, Dr.C
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable ICT o J' de Carrera, (Dr.C., M.Sc. o Ing.)
Responsable de Información Científico - Técnica

Fecha

PENSAMIENTO

“El conocimiento es la mejor inversión que se puede hacer”.

Abraham Lincoln

DEDICATORIA

*A mi querida madre **Natalia**.*

Pues a ella le debo la vida, todo lo que soy y seré.

Por la confianza, el apoyo y la formación que me ha brindado.

Por la entrega, la dedicación y el sacrificio durante estos años.

Y para que pueda ver hoy su sueño hecho realidad.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su amor, por inculcarme buenos principios, por guiarme por el camino del bien y apoyarme en todos los momentos de mi vida.

A mi tutor Yunier Valeriano Medina, por su apoyo y disposición en todo momento, por su entrega y por el conocimiento que me brindó durante la realización de esta Trabajo de Diploma.

A Pablo José Prieto Entenza, por su gran ayuda y disponibilidad, por sus acertados consejos.

A Diamir de Ávila, por dedicar parte de su tiempo a la revisión de esta tesis.

A mi novia Yalina que ha estado conmigo en todo momento. Por su cariño, comprensión, dedicación y por su apoyo incondicional, por sentir suya también esta tesis y sobre todo por su amor.

A mi padre Delvis y a su esposa Geydi porque siempre estuvieron a mi lado cuando los necesité.

A mi amigo Rolando, simplemente por ser mi hermano.

A mis abuelos y a mi tía por la preocupación ante mi rendimiento académico durante estos años.

A Néstor por el sustento económico que significó para mi mamá y para mí.

A mis compañeros de aula que durante estos últimos cinco años han compartido grandes momentos conmigo.

A Hineidy, Hilda y Candy por ser parte de mi familia.

A los profesores de los cuales adquiriré muchos conocimientos y de los que no también, por dejarme claro lo que no quiero ser.

A todo el que de forma voluntaria o no contribuyó a que pudiera llegar a donde estoy hoy.

RESUMEN

Los Vehículos Autónomos Subacuáticos (AUVs) se han convertido en una herramienta novedosa para los investigadores ya que estos tienen aplicaciones en diferentes esferas investigativas. El sistema de control es el encargado de asegurar el comportamiento autónomo de este tipo de vehículo. En los últimos tiempos se ha optado por utilizar estrategias de control no convencionales en los AUVs, atendiendo a las ventajas que ofrecen. Debido a esto, en esta investigación se presentan los resultados que ofrece el control en modo deslizante para el vehículo autónomo subacuático HRC-AUV desarrollado por el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP). La selección de esta estrategia es el resultado de una vasta revisión bibliográfica realizada. En esta investigación se presenta la metodología de diseño para el control en modo deslizante. A partir del modelo no lineal de 3 GDL que define la dinámica del HRC-AUV en el plano horizontal se diseña un control de rumbo en modo deslizante. Este diseño se evalúa mediante simulación y se aplica una solución para eliminar el efecto no deseado del *chattering*. La efectividad de esta estrategia queda demostrada al analizar el desempeño que ofrece en relación con los resultados obtenidos con un controlador PI-D presentados por GARP en investigaciones anteriores. Las ventajas desde el punto de vista económico que ofrece esta investigación aparecen recogidas en el análisis económico demostrándose su viabilidad.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
INTRODUCCIÓN	1
1.	
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL NO CONVENCIONALES A EVALUAR EN EL HRC-AUV.	5
1.1. Evolución y desarrollo de los Vehículos Autónomos Subacuáticos	5
1.1.1. Antecedentes de los vehículos autónomos subacuáticos	6
1.1.2. Ventajas de los vehículos autónomos subacuáticos	6
1.1.3. Desarrollo de los vehículos autónomos subacuáticos	7
1.2. Descripción del vehículo autónomo subacuático HRC-AUV	8
1.2.1. Modelo Dinámico	9
1.2.2. Sistema de Tolerancia a Fallos	10
1.2.3. Sistema de Guiado	11
1.2.4. Sistema de Navegación	12
1.3. Características del Control no Lineal	15
1.4. Estrategias de control utilizadas en vehículos autónomos subacuáticos	16
1.4.1. Control Convencional	17
1.4.2. Control Robusto	18
1.4.3. Control Inteligente	18

1.4.4.	Control Adaptable	19
1.4.5.	Control Deslizante	21
1.5.	Consideraciones finales del capítulo	23
2.	CONTROL EN MODO DESLIZANTE	24
2.1.	Incertidumbres en el modelo	24
2.2.	Superficie deslizante	26
2.3.	Diseño del controlador	29
2.4.	Chattering	31
2.5.	Consideraciones finales	32
3.	CONTROL EN MODO DESLIZANTE APLICADO AL HRC-AUV	34
3.1.	Modelo dinámico que describe el movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal	34
3.1.1.	Sistemas de coordenadas	35
3.1.2.	Ecuaciones dinámicas utilizadas en el modelado	35
3.1.3.	Comportamiento del modelo dinámico del HRC-AUV en el plano horizontal	38
3.2.	Diseño del controlador deslizante para el HRC-AUV.	40
3.2.1.	Selección de la superficie deslizante	41
3.2.2.	Ley de control	42
3.2.3.	Resultados del diseño	43
3.3.	Evaluación del diseño	45
3.4.	Análisis económico	47
3.5.	Consideraciones finales	48
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
	ANEXOS	59
A.	Parámetros geométricos, inerciales y experimentales del HRC-AUV	60

Índice de tablas

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
3-1.	Nomenclatura utilizada en el HRC-AUV.	36
3-2.	Actuadores y variables de control del HRC-AUV.	38
A-1.	Resumen de los parámetros identificados y estimados para el HRC-AUV. . .	60
A-2.	Valores geométricos e inerciales del HRC-AUV.	61

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1-1. Interrelación entre los sistemas diseñados para el HRC-AUV.	9
1-2. Estrategia de modelado empleada.	9
1-3. Arquitectura de Hardware del HRC-AUV.	13
2-1. Efecto del control en modo deslizante sobre la trayectoria de un sistema de segundo orden representado en espacio estado.	28
2-2. Representación del efecto chattering resultado de la acción del control deslizante.	32
3-1. Sistemas de coordenadas para un AUV con la definición de ángulos y velocidades.	35
3-2. Comportamiento del modelo dinámico de 3 GDL del HRC-AUV.	40
3-3. Esquema de control.	42
3-4. Respuesta de rumbo ante entrada tipo paso por la referencia.	43
3-5. Señal de mando afectada por el chattering.	43
3-6. Respuesta de rumbo ante entrada tipo paso por la referencia.	44
3-7. Señal de mando sin chattering.	44
3-8. Respuesta de rumbo del controlador PI-D ante entrada tipo paso por la referencia.	45
3-9. Respuesta de rumbo del controlador en modo deslizante ante entrada tipo paso por la referencia.	46

INTRODUCCIÓN

Con el surgimiento y posterior auge de “La Revolución Industrial” en Europa, el hombre se percató que podía usar su ingenio para crear maquinarias que fueran capaces de realizar tareas de diferentes índoles sin arriesgar la vida humana. A partir de entonces la visión del hombre siempre ha sido ahorrar tiempo y esfuerzo, aumentar la eficiencia así como disminuir el costo y los peligros para la vida.

Comenzaron entonces invenciones de gran magnitud como automóviles, barcos y aviones; pero resulta que la superficie del planeta está compuesta en un 70 % por agua, y es precisamente en los océanos donde se encuentra gran parte de las reservas ecológicas del mundo, recursos naturales, ecosistemas y una gran diversidad animal.

Es por ello que los científicos han tenido el afán de conocer y revelar cada uno de los misterios que se presentan en este entorno marítimo inexplorado, pero como es un ámbito de difícil acceso surge la necesidad del desarrollo de herramientas que sean capaces de adentrarse cada vez más en este medio. A raíz de esta necesidad surgen los vehículos sumergibles tripulados¹ que ayudaron a explorar el desconocido mundo marino. Estos tenían como dificultad que ponían en riesgo la vida humana en determinadas misiones.

Así emergen dos tendencias ([Lemus, 2011](#)): primeramente están los Vehículos Operados Remotamente (ROVs, *Remotely Operated Vehicles*), que resuelven la necesidad de la ausencia de tripulación pero imponen la restricción de la comunicación constante entre el vehículo y la estación de mando. Por otra parte, se encuentran los Vehículos Autónomos Subacuáticos (AUVs, *Autonomous Underwater Vehicles*), que por su autonomía permiten

¹El surgimiento de estos vehículos, en un primer momento, fue impulsado por la industria petrolera, las comunicaciones intercontinentales y la industria militar.

cierta tolerancia en aspectos como la comunicación en el medio acuático y la no presencia de tripulación en misiones que resultan a menudo riesgosas para la vida del hombre.

Varios centros de investigación y universidades del mundo han mostrado un creciente interés en los AUVs, debido a las ventajas que ofrecen y el mercado que se genera alrededor de ellos. En países como Cuba, donde la población reside cerca del mar y este constituye una fuente de alimentos, de recursos minerales y atracción turística, la utilización de estos vehículos autónomos es de gran utilidad.

En la actualidad existe un desarrollo gradual de esta tecnología con avances notables en el campo del hardware y el software, pero a Cuba le resulta una tecnología sumamente costosa. Es por ello que científicos e investigadores se ven ante la necesidad de encontrar una solución capaz de suplir esta carencia y que sea económicamente factible.

Por tal situación, el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CIDNAV) y el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, se han dado a la tarea de desarrollar un vehículo autónomo sumergible de bajo costo con propósitos investigativos (HRC-AUV). El CIDNAV se ocupa de la parte constructiva del vehículo, mientras que GARP, aprovechando su experiencia en este campo ([Pineda, 2008](#); [Martínez, 2009](#)) trabaja en el desarrollo de un autopiloto que permita al vehículo cumplir las misiones encomendadas de forma autónoma.

En tal sentido, hasta el momento los miembros del GARP han obtenido los siguientes resultados: hardware y software de bajo nivel ([Guerra, 2010](#); [Martínez, 2010](#)), software de supervisión y control ([Rodríguez, 2011](#); [Martínez, 2010](#)), instalación de sensores ([Martínez, 2010](#)), modelo dinámico del HRC-AUV ([Cañizares, 2010](#)), y una estrategia de control de rumbo diseñada a partir del modelo del HRC-AUV ([Cañizares, 2010](#); [Hernández, 2011](#)).

Estos resultados han sido corroborados en pruebas experimentales que suman más de 30 horas de trabajo, lográndose resultados satisfactorios ([Hernández, 2011](#); [Rodríguez, 2011](#); [Martínez, 2010](#)).

Con esta investigación se pretende continuar trabajando en el modelado y control del HRC-AUV. Para esto se cuenta con el modelo dinámico de 6 grados de libertad (6 GDL) del HRC-AUV, así como los de sus respectivos subsistemas (lateral y longitudinal) (Cañizares, 2010). Además, se han modelado las corrientes marinas y el oleaje que constituyen las principales perturbaciones que afectan a un AUV, sus efectos han sido incorporados al modelo y se han evaluado mediante simulación (Zamora, 2011).

Desde el punto de vista del sistema de control del vehículo, han sido diseñadas distintas estrategias convencionales para el control de rumbo y de trayectoria del HRC-AUV, probadas en experimentos en el mar (Cañizares, 2010). En estos momentos se trabaja en la implementación de un sistema de navegación basado en un filtro *Kalman*, que utiliza los datos provenientes del modelo dinámico del vehículo y de los sensores instalados.

A pesar de que ya se cuenta con versiones de control de rumbo y de trayectoria del HRC-AUV diseñados por métodos convencionales, todavía no se ha encontrado una estrategia de control que tenga en cuenta las características propias del vehículo y que sea capaz en lo adelante de interactuar con los sistemas de navegación, de tolerancia a fallo y de guiado del HRC-AUV.

Por todo lo anterior se hace necesario diseñar una estrategia de control que tenga en cuenta las complejidades dinámicas del sistema. Esta investigación precisamente tiene como propósito estudiar diferentes estrategias de control no convencionales y seleccionar la idónea para el vehículo HRC-AUV. Para ello se han trazado los siguientes objetivos:

Objetivo general:

- Diseñar una estrategia de control no convencional acorde a las características dinámicas y de operación del HRC-AUV.

Objetivos específicos:

- Seleccionar la estrategia no convencional a diseñar en el HRC-AUV teniendo en cuenta los resultados de la búsqueda bibliográfica realizada y considerando las características del HRC-AUV.

- Establecer los pasos a seguir para el diseño de la estrategia de control no convencional seleccionada.
- Diseñar la estrategia no convencional seleccionada para el HRC-AUV a partir del modelo dinámico no lineal del vehículo.
- Evaluar mediante simulación el diseño realizado para el HRC-AUV.

El aporte teórico de esta investigación radica en que contribuye a incrementar los conocimientos teóricos sobre los vehículos autónomos en el contexto cubano. La colaboración con el CIDNAV en el desarrollo y puesta en marcha de vehículos autónomos sumergibles constituye el aporte práctico de esta investigación.

Organización del Informe

La investigación incluye tres capítulos, además de las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Los temas que se abordan en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

Capítulo I: En el primer capítulo se realiza el análisis crítico de la literatura especializada consultada que permite elegir la estrategia de control que se evaluará en el HRC-AUV. Se presentan los principales conceptos que se tratan en este trabajo, introduciendo las estrategias de control no convencionales empleadas en los AUVs.

Capítulo II: En este capítulo se abordan los conceptos, definiciones y aspectos de interés esenciales referidos a la estrategia de control que será evaluada en el HRC-AUV. La metodología de diseño para la estrategia de control no convencional seleccionada para el HRC-AUV es presentada en este capítulo.

Capítulo III: En este capítulo se da a conocer el diseño realizado para el HRC-AUV enfocado en el control de rumbo del vehículo. Primeramente se presenta el modelo dinámico del HRC-AUV que determina el comportamiento del vehículo en el plano horizontal y que se utilizará como base para el diseño. Los resultados obtenidos son analizados y evaluados mediante simulación. Por último se presenta el análisis económico.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL NO CONVENCIONALES A EVALUAR EN EL HRC-AUV.

1.1. Evolución y desarrollo de los Vehículos Autónomos Subacuáticos

Los Vehículos Autónomos Subacuáticos (AUVs) se han convertido en una herramienta novedosa para los investigadores, ya que estos tienen aplicaciones en diferentes esferas investigativas que van desde los buques de investigación científica hasta los torpedos inteligentes (Desa, 2006; Antonelli, 2008).

Estos vehículos forman parte de un gran grupo de robots subacuáticos conocidos como Vehículos Submarinos no Tripulados (UUV, *Unmanned Underwater Vehicles*) en los que se incluyen también los Vehículos Operados Remotamente (ROV, *Remotely Operated Vehicles*) (Gorset, 2007; Blidberg, 2001).

Los AUVs son vehículos motorizados que se trasladan en un medio acuático y realizan diferentes misiones sin llevar a bordo operadores humanos (Fjellstad, 1994). Su capacidad de navegación autónoma le permite ejecutar tareas previamente programadas, además pueden ser dirigidos desde estaciones remotas.

En la actualidad existe un gran desarrollo de esta tecnología, pero sus inicios fueron aproximadamente hace 50 años en Estados Unidos (Gorset, 2007), expandiéndose posteriormente a otros países.

1.1.1. Antecedentes de los vehículos autónomos subacuáticos

Se puede decir que el desarrollo de los AUVs comenzó en la década del 60 con vehículos como el *UARS* y el *SPURV* construido por la “Universidad de Washington” (Blidberg, 2001). A este le siguieron otros como el *Skat* del “Instituto de Oceanología de Shirshov” (Rusia) (Blidberg, 2001).

En la década del 70, cuando los yacimientos petroleros de los mares del norte fueron descubiertos, los vehículos autónomos fueron introducidos e inmediatamente su uso se extendió a las tareas que se realizaban en las profundidades del océano. La principal dificultad de estos vehículos estaba en los sistemas de cómputo a bordo, que eran demasiado grandes, pesados y consumían mucha energía (Gorset, 2007).

Entre 1980-1990 las tecnologías de cómputo tuvieron un avance realmente notable. Computadoras pequeñas, de bajo consumo y suficiente memoria ofrecían el potencial necesario para implementar complejos algoritmos de navegación y control junto a la posibilidad de manejar datos de sensores de forma autónoma. Esta década fue de hecho un punto de giro para la tecnología de los AUVs (Gorset, 2007).

Después del año 2000 el comercio de estos vehículos ha crecido continuamente (Wernli, 2000; Antonelli, 2008) y hoy día brindan nuevas ventajas para la sociedad al convertirse en una de las herramientas más potentes utilizadas en múltiples aplicaciones submarinas.

1.1.2. Ventajas de los vehículos autónomos subacuáticos

Los AUVs permiten una navegación más cercana al objeto de estudio, incrementan la velocidad de traslación debido a que no necesitan un cable que los una a alguna embarcación en la superficie. De este modo, al ser un submarino más pequeño, de menor peso, al consumir menos tiempo y al requerir menor apoyo logístico de superficie, las misiones y maniobras subacuáticas son mucho más precisas y económicas (Acosta, 2008).

La independencia que poseen con respecto al hombre les permite disminuir el riesgo de error humano y la pérdida de vida del mismo en las misiones que le son encomendadas. Además, pueden penetrar en aguas poco profundas con menor probabilidad de colisionar.

Es por ello que con el avance de la tecnología, ha tomado gran auge el desarrollo de los vehículos autónomos subacuáticos, impulsados por la necesidad del hombre en ganar movilidad y aumentar la capacidad de explotación de recursos naturales que se encuentran en los océanos.

1.1.3. Desarrollo de los vehículos autónomos subacuáticos

Los AUVs se han convertido en una herramienta poderosa para aplicaciones científicas, medioambientales y militares. En la actualidad los investigadores se han enfocado en perfeccionar los sistemas automáticos que poseen este tipo de vehículo y que les permite cumplir las misiones con mayor precisión.

El desarrollo de estos vehículos ha sido una tarea científico-técnica desarrollada por múltiples universidades, institutos y centros de investigación y producción de todo el mundo ([Blidberg, 2001](#)), quienes llevan a cabo proyectos de desarrollo con un alto nivel científico.

Algunos ejemplos lo constituyen la “Universidad de Beihang” de China ([Liang, 2008](#)) y la “Universidad de Zagreb” de Croacia ([Miskovic, 2008](#)), la “Agencia de ciencia y tecnología de tierra y mar” en Japón ([Yoshida, 2008](#)) y la “Universidad de Newcastle” en Australia ([Perez, 2008](#)). Los prototipos de AUVs en el ámbito científico poseen características especiales, generalmente son vehículos pequeños y de bajo costo ([Wernli, 2000](#)), tales son los casos del *Odyssey*, del “Instituto de Tecnologías de Massachusetts” (MIT) ([Jakuba, 2003](#)) y el AUV *Morpheus*, de la “Universidad Atlántica de Florida” ([Wernli, 2000](#)).

Existen prototipos comerciales actualmente en operación como son los casos del *HUGIN* ([Hegrenaes, 2007](#); [Jalving, 2004](#)), el *R-One Robot* ([Kim, 2002, 2003](#)), el *Explorer* y el *CETUS II* ([Wernli, 2000](#)).

En Cuba el desarrollo de los AUVs es escaso y las áreas de aplicación pudieran abarcar desde la explotación pesquera, de minerales y petróleo hasta estudios medioambientales. Debido a esto el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CIDNAV) conjuntamente con

el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas desarrollan un vehículo subacuático autónomo (Martínez, 2010).

Hasta el momento el GARP ha venido trabajando en el diseño de un sistema de control con resultados satisfactorios en pruebas experimentales, pero debido a la complejidad dinámica del vehículo, de los sistemas que se están diseñando y de las tareas que debe acometer, se hace necesario evaluar estrategias de control de mayor complejidad.

1.2. Descripción del vehículo autónomo subacuático HRC-AUV

El HRC-AUV es un vehículo cilíndrico, con una estructura similar al *HUGIN 4500* (Hegrenaes, 2007) o al *STARFISH* (Sangekar, 2008). Es un AUV de 9,5 m de longitud y una masa aproximada de 4096 kg, presenta una velocidad crucero de 1.9 m/s y está capacitado para maniobrar a profundidades de hasta 10 m con un propulsor y dos timones de cola.

Hasta este momento se cuenta con el modelo dinámico del vehículo y han sido diseñados los sistemas de navegación y de guiado del submarino. Actualmente se trabaja en el perfeccionamiento de estos sistemas y en una investigación paralela a esta, se dan los primeros pasos del diseño del sistema de tolerancia a fallos del vehículo. Para lograr la correcta interacción entre estos sistemas es necesario diseñar una estrategia de control adecuada. La figura 1-1 muestra un esquema donde se aprecia la interrelación existente entre los sistemas diseñados para el HRC-AUV.

El sistema de control constituye el eje fundamental de esta investigación. Como se ha hecho referencia con anterioridad, este tiene que diseñarse teniendo en cuenta las características dinámicas del vehículo y las condiciones de operación del mismo, además debe interactuar de manera correcta con los otros sistemas instalados. Para la selección de la estrategia de control a diseñar para el HRC-AUV se hace necesario caracterizar al vehículo y a los sistemas que aseguran el guiado, la navegación y la tolerancia a fallos del mismo.

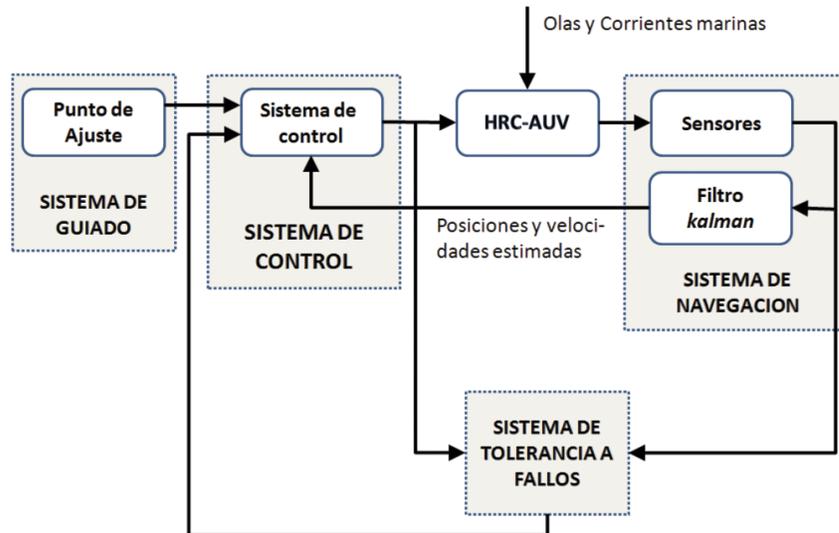


Figura 1–1: Interrelación entre los sistemas diseñados para el HRC-AUV.

1.2.1. Modelo Dinámico

Para la obtención de este modelo se empleó un procedimiento basado en la geometría del AUV (Cañizares, 2010) y algunos parámetros se determinaron mediante identificación experimental.

Una vez obtenido el modelo general de 6 GDL del HRC-AUV fue posible simplificarlo teniendo en cuenta las condiciones de operación, tal como se muestra en la figura 1–2.

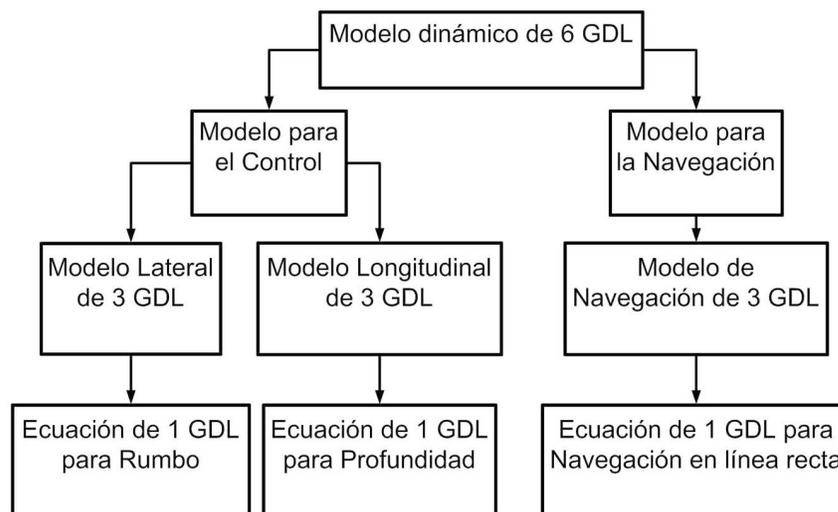


Figura 1–2: Estrategia de modelado empleada.

Para el caso del control, el modelo no lineal de 6 GDL se dividió en dos submodelos: lateral y longitudinal, de 3 GDL cada uno. Estos fueron simplificados aun más teniendo

en cuenta que el AUV operará ante pequeñas variaciones alrededor del punto de operación con el objetivo de sintonizar controladores lineales (Cañizares, 2010).

En el caso de la navegación se partió de asumir que el vehículo se movería en un solo plano, lo cual permitió expresar la dinámica a través de un submodelo de 3 GDL (Cañizares, 2010).

Las principales perturbaciones que afectan a los vehículos subacuáticos durante la navegación lo constituyen el oleaje generado por el viento y las corrientes marinas. En la literatura se reporta un método que permite modelar estas perturbaciones con exactitud (Fossen, 1994).

Para que los sistemas de navegación y de control del HRC-AUV -diseñados por GARP- logren mejores resultados y robustez, han sido introducidos los efectos de las perturbaciones dentro del modelo general de 6 GDL (Zamora, 2011).

En investigaciones anteriores realizadas por GARP se presentó el modelo dinámico del HRC-AUV, con todos sus parámetros calculados e incluido el efecto de las corrientes marinas y el oleaje (Cañizares, 2010; Zamora, 2011).

1.2.2. Sistema de Tolerancia a Fallos

Los fallos pueden ocurrir debido a cambios en el modo de operación (suponiendo distintos modos de operación) o a un mal funcionamiento que puede ocurrir en los sensores, actuadores o en el propio sistema.

Existen varios tipos de fallos como son: fallos de medida aditivos, de procesos aditivos, de procesos multiplicativos, abruptos e incipientes. Estos pueden manifestarse respectivamente con desviaciones entre valores medidos y reales, perturbaciones en la planta, fallos repentinos o graduales de los parámetros de la planta, fallos imprevistos que adquieren en el instante en que se producen tamaños significativos y fallos que evolucionan lentamente.

Debido a estas razones es necesario contar con un sistema tolerante a fallos que permita la corrección de los mismos.

Se define entonces la tolerancia a fallos como la capacidad de un sistema de control para mantener sus objetivos a pesar de la aparición de un fallo o desviación, admitiéndose una cierta degradación de sus prestaciones pero manteniéndose siempre un comportamiento estable del sistema (Puig, 2004).

La tolerancia a fallos en sistemas dinámicos se logra a través de la redundancia analítica o la redundancia paralela (redundancia de hardware) (Ni, 2001).

Según la literatura consultada (Ni, 2001), un sistema de control tolerante a fallos basado en redundancia analítica consta de tres subsistemas:

- Subsistema de detección de fallos: es una función de alto nivel que monitorea todo el sistema y detecta la ocurrencia de fallos.
- Subsistema de identificación de fallos: localiza el elemento fallido y calcula la magnitud y tiempo en que ocurrió el fallo.
- Subsistema de reconfiguración: reestructura o reconfigura la ley de control, que permite al sistema seguir funcionando, aceptándose un comportamiento degradado pero estable del sistema a pesar de los fallos.

Para el caso particular del HRC-AUV, la detección e identificación de fallos empleando redundancia analítica (basada en el modelo dinámico del vehículo) constituye el método más apropiado. En estos momentos GARP, en una investigación paralela a esta, da los primeros pasos en el diseño de un sistema de tolerancia a fallos para el HRC-AUV.

1.2.3. Sistema de Guiado

El guiado es el sistema que continuamente calcula la posición, velocidad y aceleración deseada para el vehículo. Existen técnicas avanzadas de optimización para el cálculo de la trayectoria a seguir que tienen como objetivo disminuir el tiempo de navegación, evitar colisiones, optimización del combustible, formación y sincronización de varios vehículos (Zamora, 2011).

El método utilizado para lograr que el HRC-AUV siga una trayectoria deseada es conocido como *LOS* (*Line of Sight*) y consiste en unir mediante líneas rectas y arcos de

circunferencia los puntos consecutivos del trayecto que se desea describa el AUV (Fossen, 1994; Encarnaçao, 2002).

Mediante el software de navegación¹ desarrollado por GARP (Lemus, 2011), el usuario crea el vector de coordenadas deseado (x_d, y_d) , definiendo así la ruta que debe seguir el vehículo sin restricciones de tiempo ni espaciales. Constantemente se verifican las coordenadas reales del AUV (x, y) , se determina el vector *LOS* hasta el punto sobre la recta y se ejecuta la ley de control (Zamora, 2011) para minimizar la distancia perpendicular del vehículo hasta dicha línea recta entre los puntos (x, y) y (x_{k+1}, y_{k+1}) . Para aplicar esta ley de guiado se hace necesario contar con un control de rumbo del vehículo. En el caso del HRC-AUV se ha implementado hasta el momento utilizando controladores PID convencionales.

Al ser incluido en el modelo dinámico del vehículo el efecto de las corrientes marinas y el oleaje, esta estrategia de guiado tiene la ventaja que contrarresta estos efectos no deseados que son los causantes de que el vehículo siga la trayectoria planificada con errores significativos.

La estrategia de guiado para el HRC-AUV fue presentada en una investigación anterior realizada por GARP y está pendiente de ser evaluada en pruebas experimentales en el mar (Zamora, 2011).

1.2.4. Sistema de Navegación

GARP ha seleccionado una configuración de sensores y sistemas de cómputo capaces de obtener una solución de navegación autónoma. Se puede realizar una división entre los sistemas de cómputo de acuerdo a las tareas que desempeña el sistema:

¹Este software se encarga de llevar a cabo un conjunto de tareas entre las que se encuentran: la navegación, la atención al servidor de datos, la configuración, el guiado, etc. Un temporizador controla la ejecución de los algoritmos de guiado del vehículo a 10 Hz.

- El sistema de cómputo inherente al control: encargado de ejecutar todos los lazos de control de la embarcación subacuática.
- El sistema de cómputo inherente a la navegación: su tarea es procesar y adquirir las variables de navegación.

Debido a la alta carga matemática de este último y para la implementación del software de navegación en tiempo real, se eligió una computadora industrial PC-104 de *Advantech*, la cual se encargará de almacenar, procesar y transmitir información. Sus interfaces de software son de alto nivel, desarrolladas en lenguajes como *C++* y *C#*. El Sistema Operativo empleado en la *PC-104* fue *GNU-Linux*. Para el desarrollo apropiado del modelo del sistema se utiliza el Lenguaje Unificado de Modelado (UML, *Unified Model Language*).

En la figura 1-3 se muestra el esquema sensorial instalado en el HRC-AUV.

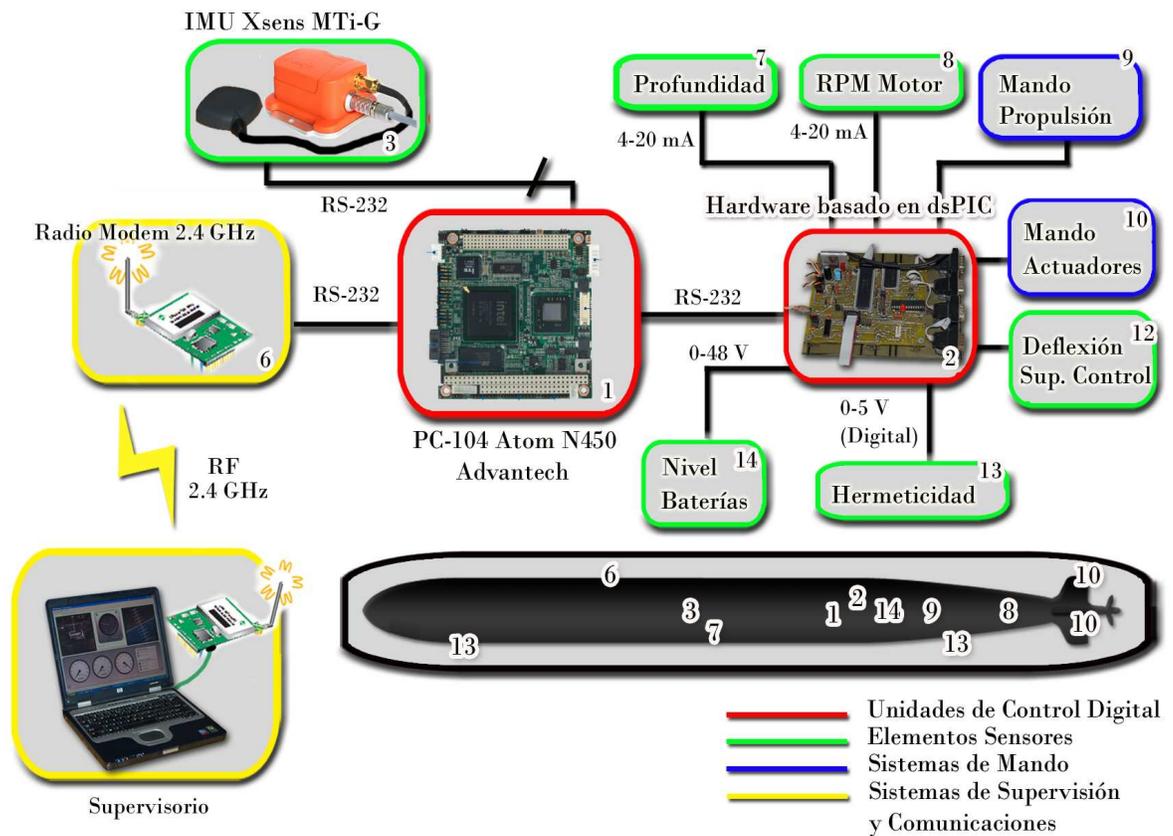


Figura 1-3: Arquitectura de Hardware del HRC-AUV.

Como se puede apreciar el HRC-AUV cuenta con un conjunto de sensores destinados a la navegación (Martínez, 2010).

Sensores asociados al sistema de cómputo inherente a la navegación ([Martínez, 2010](#)):

- Unidad de Medición Inercial (IMU) Mti de *Xsens*. Sistema fundamental para la navegación y el control, consta de tres acelerómetros, tres giróscopos y tres magnetómetros.
- Receptor Sistema de Posicionamiento Global (GPS) XL12 de *Garmin*. Provee información de la posición y la velocidad del vehículo sin acumular el error.
- Sensor de presión para determinar la profundidad del vehículo.
- Sensor para medir las rpm (revoluciones por minuto) del motor propulsor.
- Sensores de posición angular de los timones de la nave.

El filtro de *Kalman* es una poderosa herramienta para estimar el estado instantáneo de un sistema lineal de ecuaciones diferenciales. Contrariamente, las aplicaciones más conocidas e interesantes del filtrado de *Kalman*, se realizan sobre sistemas no lineales. Esto sucede cuando se modelan los sistemas con exactitud y se reflejan las no linealidades inherentes del mundo real.

Una forma de enfrentar este dilema está en el uso del Filtro Extendido de *Kalman* (EKF), el mismo puede linealizar el sistema alrededor de la media y la covarianza actual ([Welch, 2001](#)).

El filtro de *Kalman*, así como su variante extendida, consta de una etapa de predicción y una de corrección. En la primera, el vector de estado (x_k), y la matriz de covarianza del error (P_k), son predecidas de acuerdo a la dinámica del sistema, obteniendo un estado a “priori” del mismo. Por otra parte, en la segunda se realiza la corrección de los valores estimados anteriormente a partir de las mediciones afectadas por el ruido blanco, permitiendo obtener un estado a “posteriori” del vector de estado y la covarianza. Una cuestión muy importante en esta segunda etapa es el papel de la Matriz de Ganancia de *Kalman* (K_k), la cual pondera las predicciones o la medición para su efecto final en la corrección, de acuerdo con la calidad de las mismas.

Las entradas de este filtro son las señales provenientes de los sensores asociados al Sistema de Navegación. El algoritmo del filtro se ejecuta en la *PC-104*.

En estos momentos se cuenta con un primera versión del Sistema de Navegación para el HRC-AUV pendiente a ser evaluada en pruebas experimentales (Sosa, 2010; Lemus, 2011).

1.3. Características del Control no Lineal

El control lineal cuenta con una gran variedad de métodos que a lo largo de la historia han sido aplicados en numerosos procesos industriales. Sin embargo, los investigadores y diseñadores de áreas como la robótica, el control de procesos y la ingeniería Biomédica, entre otros, últimamente han mostrado mayor interés en el desarrollo y aplicaciones de las metodologías del control no lineal. Entre las causas que han propiciado este auge se pueden enumerar (Slotine, 1991):

1. Perfeccionamiento de los sistemas de control existentes: Los métodos utilizados en el control lineal parten de asumir un pequeño rango de operación válido para el modelo lineal. Cuando el rango de operación es amplio, el desempeño de un controlador lineal es pobre o incluso inestable debido a que no es capaz de compensar las no linealidades. El control no lineal puede manejar directamente las no linealidades en un amplio rango de operación.

2. Análisis de no linealidades inherentes: Otra suposición del control lineal es que el modelo del sistema es linealizable, sin embargo, en los sistemas de control existen varias no linealidades que debido a su naturaleza discontinua no permiten aproximación lineal alguna. Estas no linealidades fuertes incluyen a la fricción de *Coulomb*, la saturación, la zona muerta y otras que están presentes en la ingeniería del control. Estos efectos no pueden ser deducidos a partir de métodos lineales.

3. El tratamiento de modelos con incertidumbres: Al diseñar controladores lineales usualmente es necesario asumir que los parámetros del modelo son conocidos, sin embargo, muchos problemas de control están dados por las incertidumbres en los parámetros del modelo. Un controlador lineal basado en valores inexactos de los parámetros del modelo puede conllevar a un desempeño inestable.

4. La simplicidad en el diseño: El diseño de un buen control no lineal puede ser más fácil y más intuitivo que sus contrapartes lineales. Este resultado paradójico “a priori” viene dado por el hecho de que el diseño de controladores no lineales está a menudo profundamente arraigado en la física de los sistemas.

Existen otras razones por las cuales se recomienda utilizar técnicas de control no lineal tales como el costo y el desempeño óptimo de los sistemas. El control lineal puede requerir actuadores y sensores de alta calidad para producir un comportamiento lineal en el rango de operación especificado, mientras que el control no lineal puede permitir el uso de componentes menos costosos con características no lineales.

De esta manera, el tema del control no lineal constituye un área importante del control automático. Anteriormente la aplicación de métodos de control no lineal había sido limitada por la dificultad computacional, sin embargo, los avances en la tecnología de cómputo han venido a solucionar este impedimento. El tema del diseño de control no lineal para un amplio rango de operación ha atraído la atención de los diseñadores, debido por una parte a la existencia en la actualidad de poderosos microprocesadores que han permitido que la implementación de controladores no lineales resulte relativamente simple, y por otro lado, a las aplicaciones sofisticadas que han ido apareciendo con requisitos de alta velocidad de respuesta y precisión.

El HRC-AUV constituye una planta con un alto grado de no linealidades entre ellas algunas inherentes como la fricción de *Coulomb* y la saturación. La estrategia de control que se diseñe tendrá a su cargo la responsabilidad de cumplir con tareas complejas que exigen altos grados de exactitud y precisión, de ahí que se requiera de una estrategia basada en controladores no lineales.

1.4. Estrategias de control utilizadas en vehículos autónomos subacuáticos

Los sistemas de control empleados en AUVs se dividen en dos grandes grupos, aquellos que utilizan controladores convencionales y otros que emplean estrategias de control no lineales. A partir de la búsqueda realizada en la literatura especializada se pudo constatar

que las estrategias no convencionales de control más utilizadas en vehículos de este tipo son: Control Inteligente, Control Robusto, Control Adaptable y Control Deslizante. Existen otras estrategias de control no convencionales como son: Control Óptimo (Arslan, 2008) y Control Geométrico (Andonian, 2010), así como combinaciones entre todas ellas conocidos como híbridos.

En un 20.51 % de la bibliografía consultada se utiliza controladores PID, un 20.58 % emplean controladores inteligentes, el 20.51 % de los autores consultados sugieren control adaptable, el 12.82 % propone utilizar técnica de control robusto y el 38.46 % recomienda emplear control deslizante.

1.4.1. Control Convencional

En el vehículo autónomo subacuático *R-One Robot* se emplean controladores tipo PID para los lazos de rumbo y profundidad (Kim, 2002). En este caso los autores diseñan las estrategias de control a partir de un modelo dinámico en espacio-estado linealizado alrededor de un punto de operación. Para el caso del rumbo la señal de control actúa sobre el timón horizontal, mientras que para profundidad la señal de control se divide en dos, debido a que el vehículo cuenta con dos estabilizadores laterales.

El *NDRE-AUV* es otro vehículo que utiliza controladores PID para controlar el ángulo de guiñada y la profundidad (Jalving, 1994). Los lazos de control se diseñan a partir de funciones de transferencia obtenidas luego de simplificar el modelo dinámico del vehículo. En esta aplicación solo se utiliza el efecto proporcional. Como es lógico, el empleo de controladores P provoca un error en estado estable, pero según el autor este error es menos dañino que la saturación que aparece al introducir el efecto integral.

En el proyecto HRC-AUV también han sido utilizados estos tipos de controladores (Martínez, 2010), específicamente se empleó una variante tipo PI-D para controlar el rumbo del vehículo. Su desempeño fue evaluado mediante simulación y en pruebas realizadas en el mar, obteniéndose resultados satisfactorios. El diseño se realizó a partir de la función de transferencia linealizada que relaciona el ángulo de guiñada del vehículo y la variación

del ángulo del timón horizontal. No obstante, al evaluar los resultados se apreció cómo las perturbaciones y las no linealidades propias del sistema afectaron el desempeño del HRC-AUV.

1.4.2. Control Robusto

Un control H_∞ es una técnica de control robusto. Varias aplicaciones de estos controladores son reportadas en submarinos (Liceaga, 1995; Van der Molen, 1993; Williams, 1991; Feng, 2004).

Un controlador H_∞ teniendo en cuenta el efecto del oleaje fue diseñado con el objetivo de mantener estable el valor de la profundidad en un AUV (Liceaga, 1995). En este caso particular los autores utilizaron un modelo del vehículo y del oleaje, asegurando de esta manera la robustez del lazo. El diseño se realizó empleando el método de aproximación polinomial que aparece en el *toolbox* del *Matlab*.

De manera similar Van der Molen y Grimble (Van der Molen, 1993) proponen utilizar técnicas de control H_∞ para mantener estable la profundidad en un AUV. Estos autores también utilizan un modelo dinámico del vehículo linealizado en un punto de operación y un modelo simplificado del oleaje. La característica que distingue su propuesta es que emplean un controlador H_∞ multivariable (2x2) que relaciona el ángulo de cabeceo con la profundidad.

Otros autores proponen el empleo de esta técnica con vista a eliminar el efecto de la saturación de los actuadores (Williams, 1991). Williams y otros colegas (Williams, 1991) proponen utilizar un control H_∞ diseñado en función de la velocidad de operación del vehículo. De manera que cuando aumente la velocidad se pueda conmutar de controlador a uno que asegure mayor robustez ante la presencia de la saturación.

1.4.3. Control Inteligente

Herramientas basadas en lógica difusa y redes neuronales también han sido aplicadas por varios investigadores en el control de AUVs (Ishaque, 2010). La lógica difusa ha sido empleada para modelar aquellos sistemas que presentan incertidumbre en sus parámetros.

En el caso de los vehículos subacuáticos los parámetros que aportan cierto grado de incertidumbre son los relacionados con el amortiguamiento viscoso, las ganancias del vector de entradas de control y los relacionados con las corrientes marinas y el oleaje.

En tal sentido, existen autores que utilizan la lógica difusa para obtener el modelo dinámico no lineal de un submarino. Ese es el caso de Chang y otros autores ([Chang, 2003](#)) que utilizan las reglas de Takagi-Sugeno para obtener el modelo no lineal del *INFANTE AUV* en el plano horizontal. Una vez obtenido el modelo, el mismo es utilizado para sintonizar un controlador inteligente.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son algoritmos computacionales que intentan emular el comportamiento de las redes neuronales biológicas. Estos programas son usados para aprender estrategias de solución basadas en ejemplos típicos de comportamiento de patrones. El uso de las RNA para el diseño de controladores tiene como ventaja que la dinámica de los sistemas controlados no necesita ser completamente conocida.

Un controlador adaptable utilizando redes neuronales es propuesto por Ishii y otros autores ([Ishii, 2000](#)) para el control del robot subacuático *Twin-Burger*. El objetivo del control es lograr que la dirección del vehículo se mantenga durante el seguimiento de una trayectoria en una zona donde no es posible prever el comportamiento de las perturbaciones.

Por su parte un controlador neuro-difuso es utilizado en el control del vehículo *ODIN* ([Kim, 2001](#)). Esta variante intenta aprovechar las ventajas que ofrecen la lógica difusa y las redes neuronales, de esta manera a partir de reglas difusas iniciales dadas por un operador, o automáticamente generadas por un controlador, el vehículo podrá adquirir los parámetros del control sin intervención humana, tomando en consideración para ello las características de los sensores instalados y del ambiente donde opera.

1.4.4. Control Adaptable

La dinámica de los robots subacuáticos es altamente no lineal, acoplada y variante en el tiempo, y se encuentra sujeta a las incertidumbres hidrodinámicas y a perturbaciones

externas tales como las corrientes marinas. Varios investigadores han recurrido al control adaptable para estimar los parámetros del sistema y a partir de ellos establecer el control (Antonelli, 2001; Fossen, 1996; Sun, 2003, 2008; Yuh, 1999). Esta estrategia adapta la ley de control a las variaciones de los parámetros del modelo.

En tal sentido, Antonelli y otros autores (Antonelli, 2001) proponen una estrategia de control adaptable para el cumplimiento de misiones autónomas de un AUV. Para ello es necesario contar con un modelo dinámico de 6 GDL. Esta propuesta tiene como particularidad que la representación de la orientación del vehículo se realiza mediante “cuaternios”, con esto se evitan las singularidades que surgen al utilizar los ángulos de Euler (Fossen, 2006). El controlador adaptativo diseñado fue implementado y validado experimentalmente en el AUV *ODIN*, construido por la “Universidad de Hawai”. Los resultados experimentales obtenidos demuestran el buen desempeño del control propuesto.

Un control adaptable robusto fue diseñado a partir de los datos geométricos e inerciales del vehículo *NPS AUV II* (Fossen, 1996). En este tipo de vehículos se dificulta la medición de las velocidades lineales, haciéndose necesario emplear observadores no lineales para su estimación. Esto incorpora un alto grado de incertidumbre al sistema justificándose así el empleo de una estrategia de control adaptable. El diseño se realiza a partir del modelo de 3 GDL del *NPS AUV II*. La efectividad de esta estrategia se demuestra mediante simulación.

Sun y Cheah (Sun, 2003) proponen un controlador adaptable del tipo SP-D (Proporcional Saturado-Derivativo) evaluado en el AUV *ODIN*. Para diseñar este controlador no es necesario tener conocimiento sobre la mayoría de los parámetros dinámicos del vehículo. En esta propuesta interviene un controlador PD sumado a una ley adaptable de control. La principal ventaja de esta estrategia es que seleccionando de manera directa la ganancia proporcional y derivativa se asegura la estabilidad global asintótica del sistema.

En vehículos subacuáticos son varias las formas en que se estima la posición del móvil. Ninguna de las utilizadas está exenta de introducir inexactitudes e incertidumbres en los parámetros que se miden, es por eso que Yuh y otros autores (Yuh, 1999) proponen un

control adaptable para robots subacuáticos que utilizan un sensor sonar para estimar la posición del vehículo. En este caso, las mediciones son afectadas por el ruido, la baja resolución y otros factores que se encuentran presentes en el ambiente marino. El esquema de control presentado es diferente a los esquemas de control adaptable convencionales, debido a que en este se estiman de manera conjunta las constantes desconocidas que forman parte de las matrices dinámicas del sistema, en lugar de estimar cada uno de los parámetros por separado. Esta estrategia fue evaluada en el AUV *ODIN* y los resultados experimentales muestran la robustez del sistema de control en presencia de la dinámica no modelada y de varios ruidos.

1.4.5. Control Deslizante

Debido al alto componente no lineal presente en la dinámica de los vehículos subacuáticos, a su comportamiento variante en el tiempo, a lo complejo de modelar que son los parámetros que están vinculados con la hidrodinámica y a que los afectan perturbaciones que son muy complicadas de medir, es que varios autores ([Healey, 1993](#); [Yoerger, 1985](#); [Fossen, 1994](#); [Lienard, 1990](#); [Wang, 2002](#); [Akçakaya, 2009](#)) han evaluado la conveniencia de utilizar el control deslizante en este tipo de vehículo.

El control en modo deslizante (SMC, por sus siglas en inglés) es un esquema de control no lineal que requiere una estimación previa de los parámetros del sistema y del grado de incertidumbre que los acompaña. Su diseño se basa en seleccionar una superficie deslizante donde actuará la ley de control. El modo deslizante restringe el movimiento del sistema a un determinado subespacio de trabajo y converge asintóticamente al punto de equilibrio. Este esquema de control suele ser muy robusto ante variaciones en los parámetros y afectaciones provocadas por perturbaciones. La principal desventaja del control deslizante radica en el efecto *chattering*.

Autores como Healey y Lienard ([Healey, 1993](#)) utilizan el control deslizante para diseñar un autopiloto a partir del modelo de 6 GDL del *NPS AUV II*. En esta aplicación el autopiloto se diseña de manera separada, creándose subsistemas que permiten el adecuado

control de la dirección, la profundidad y la velocidad del vehículo. Varias simulaciones, que incluyen cómo el sistema es capaz de contrarrestar el efecto de las corrientes marinas, demuestran la efectividad y robustez de esta propuesta.

Yoerger y Slotine ([Yoerger, 1985](#)) proponen un control deslizante para el seguimiento de trayectoria del robot subacuático *ARGO/JASON*. Estos autores plantean que el diseño de esta variante de control a partir de un modelo no lineal puede ser más sencillo y efectivo que las técnicas conocidas del control lineal. La utilización de un modelo que incluya las no linealidades del sistema asegura diseñar un solo controlador. Si se emplean modelos linealizados, entonces habría que diseñar distintas configuraciones de control que aseguren la robustez del sistema cuando se produzcan variaciones en las condiciones de operación del vehículo.

Fossen ([Fossen, 1994](#)) también aborda las ventajas de utilizar la estrategia SMC en vehículos subacuáticos y propone utilizar un modelo simplificado de 6 GDL del robot para el diseño del control. Específicamente este autor propone el control deslizante para seguimiento de trayectoria. No obstante, presenta cómo utilizar el control deslizante cuando se desea controlar más de un estado como pudiera ser la velocidad, dirección o cabeceo y profundidad combinado.

Después de evaluar las distintas variantes, se decide que la estrategia de control deslizante es la adecuada para ser evaluada en el HRC-AUV. Esta selección se realiza atendiendo al adecuado tratamiento que el control deslizante da a las no linealidades, a la incertidumbre que aportan los parámetros hidrodinámicos y a las afectaciones provocadas por las perturbaciones en estos vehículos. Además, con el control deslizante es posible controlar prácticamente todas las variables que se miden en los AUVs. Resultados satisfactorios de investigaciones realizadas por prestigiosos autores en la temática de control de AUVs la convierten en la estrategia de control más utilizada en este tipo de vehículos. Incluso, en varios trabajos consultados ([Yoerger, 1985](#); [Lienard, 1990](#); [Akcakaya, 2009](#)) se plantea que el control deslizante constituye la variante de control ideal para ser empleada en vehículos subacuáticos.

1.5. Consideraciones finales del capítulo

Reconocidas universidades y centros de investigación de todo el mundo dedican importantes esfuerzos al desarrollo de vehículos autónomos subacuáticos. En Cuba esta temática comienza a convertirse en una línea de investigación de creciente interés con el desarrollo del proyecto HRC-AUV. Hasta el momento GARP cuenta con el modelo dinámico del vehículo y con estrategias convencionales para el control de rumbo y trayectoria probadas con buenos resultados en pruebas en el mar.

Sin embargo, teniendo en cuenta las características no lineales del HRC-AUV y los complejos sistemas que se están diseñando para la navegación, el guiado y la detección de fallos, se hace necesario diseñar una estrategia de control no convencional.

Como resultado de la revisión bibliográfica realizada se pudo comprobar que las estrategias de control no convencionales más utilizadas en vehículos autónomos son: Control Robusto, Control Adaptable, Control Inteligente y Control Deslizante.

El control deslizante se ajusta perfectamente a las características del HRC-AUV. Con esta variante de control es posible tratar de manera adecuada las no linealidades presentes en los AUVs. Debido a los buenos resultados que ofrece, constituye la estrategia de control relacionada con vehículos subacuáticos que con mayor frecuencia se reporta en la literatura. Por todo lo anterior, en esta investigación se diseña un controlador de rumbo en modo deslizante para el vehículo HRC-AUV.

CAPÍTULO 2

CONTROL EN MODO DESLIZANTE

En este capítulo se presenta la metodología para el diseño de un controlador en modo deslizante. Las ecuaciones dinámicas que definen la estructura del control en modo deslizante están determinadas por las no linealidades y las incertidumbres del sistema. El método de estabilidad de *Lyapunov* asegura el adecuado desempeño de esta estrategia de control. La implementación de un control en modo deslizante asegura que el comportamiento de un sistema de orden superior sea similar al de un sistema de primer orden.

2.1. Incertidumbres en el modelo

Las imprecisiones del modelo dinámico no lineal de un sistema determinado están dadas por la incertidumbre de algunos de sus parámetros y por las simplificaciones que se realizan de la dinámica del mismo. Las inexactitudes del modelo son efectos adversos para los sistemas de control no lineal, por lo que se hace necesario diseñar una estrategia de control que asegure robustez ([Akcakaya, 2009](#)).

Un AUV presenta una dinámica no lineal debido a parámetros relacionados con la inercia, la flotabilidad y los efectos hidrodinámicos. El control de estos vehículos constituye una tarea de gran envergadura dada la facilidad con que cambia su dinámica y a los complejos movimientos que realizan en varios ejes que acentúan sus características no lineales. Incluso para el movimiento en un eje, un regulador lineal no proporciona un funcionamiento adecuado para un amplio rango de velocidades de operación ([Yoerger, 1985](#)).

Otra de las complejidades que surge en el modelo dinámico de este tipo de vehículo viene dada por la dificultad a la hora de calcular los coeficientes hidrodinámicos, los cuales son difíciles de obtener e incorporan un alto grado de inexactitud. Los coeficientes generalmente se calculan utilizando técnicas semi-empíricas basadas en la geometría del vehículo o realizando experimentos en un canal de prueba. Debido a su estrecha relación con la velocidad del vehículo los valores de estos coeficientes constituyen solo una aproximación, lo cual le resta exactitud al modelo dinámico.

El acoplamiento existente en los AUVs afecta también su comportamiento dinámico. Este tipo de interacción se evidencia durante el movimiento en varios ejes a la misma vez.

Por otra parte, las perturbaciones que actúan sobre un vehículo subacuático son difíciles de modelar, de medir o estimar. Incluso, en reiteradas ocasiones no se cuenta con una medición exacta de las corrientes marinas que desvían de la trayectoria a este tipo de vehículo (Yoerger, 1985).

Para utilizar los métodos de diseño de controladores lineales en un sistema no lineal, los modelos deben ser primeramente linealizados. Para un vehículo subacuático que se mueva en una sola dirección, la linealización a partir de varios valores de velocidad crucero puede constituir una aproximación aceptada. Sin embargo, para un vehículo que se mueve en cualquier dirección, la linealización debe tener en cuenta varias combinaciones de valores de velocidad a lo largo de los distintos ejes.

Debido a que cada configuración linealizada constituye un controlador a diseñar, esta aproximación necesita un gran esfuerzo desde el punto de vista de diseño. Controladores con ganancia programadas constituyen una solución generalmente utilizada, pero no asegura en todo momento la estabilidad del sistema.

En resumen, la dinámica de los vehículos subacuáticos es altamente no lineal con un alto grado de incertidumbre y las perturbaciones son difíciles de estimar. Debido a estas características, las técnicas de control no lineal ofrecen un mejor desempeño que los controladores lineales.

2.2. Superficie deslizante

El propósito de la ley de control en modo deslizante radica en conducir un sistema no lineal a un estado deseado dentro de una superficie específica representada en espacio estado y mantener el estado de la planta en esa superficie por todo el tiempo subsiguiente. La superficie es conocida como superficie deslizante (Ming, 1997; Slotine, 1991; Akcakaya, 2009).

Cuando el estado del sistema está sobre la superficie, el esquema de control tiene una ganancia determinada y si el sistema no se encuentra sobre la superficie la ganancia tendrá un valor diferente.

Idealmente, una vez interceptada la superficie, el control en modo deslizante mantiene el estado de la planta en la superficie para todo el tiempo subsiguiente. Por tanto los esfuerzos deben centrarse en diseñar un control en modo deslizante que conduzca a la planta a la superficie deslizante y la mantenga sobre la misma.

La dinámica de un sistema de simple entrada simple salida (SISO) puede expresarse como (Yoerger, 1985):

$$x^n = b(x, t)[f(x, t) + U(t) + d(t)] \quad (2.1)$$

donde x^n es la derivada de orden n del estado x y $U(t)$ es la entrada de control. Por su parte $f(x, t)$ y $b(x, t)$ son generalmente funciones dependientes del estado y del tiempo. La función $f(x, t)$ agrupa los términos no lineales y que son complejos de modelar y $b(x, t)$ está integrada por parámetros del modelo del sistema que son poco conocidos. El término $d(t)$ agrupa las perturbaciones que afectan al sistema.

El problema de control consiste en que el estado del sistema (x) siga un estado específico y variable en el tiempo ($x_d(t)$) independientemente de las imprecisiones y no linealidades del modelo ($b(x, t)$, $f(x, t)$) y a las afectaciones provocadas por las perturbaciones ($d(t)$) (Yoerger, 1985).

La ecuación 2.2 define matemáticamente la estructura de la superficie deslizante $s(x, t)$.

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (2.2)$$

donde λ es una constante positiva que se selecciona a partir del desempeño del sistema en cuanto a velocidad de respuesta se refiere y $\tilde{x}(t) = x_d(t) - x(t)$ es el error de la salida del sistema, siendo $x_d(t)$ el estado deseado.

Para aquellos sistemas con representación dinámica de segundo orden, es posible reducir la ecuación 2.3 que define la superficie a una función de primer orden.

$$s(x, t) = \dot{\tilde{x}} + \lambda \tilde{x} \quad (2.3)$$

De esta manera, la superficie deslizante constituye una línea recta de pendiente λ por lo que el comportamiento del sistema, una vez alcanzada la superficie deslizante, será similar al de un sistema de primer orden (Slotine, 1991).

La ley de control a diseñar tiene como propósito lograr que el sistema sea estable lo que se consigue asegurando la convergencia de $s(x, t)$ a cero. Para lograr este objetivo se aplica el criterio de estabilidad de Lyapunov. El método de estabilidad de Lyapunov es usualmente utilizado para determinar las propiedades de estabilidad de un punto de equilibrio sin solucionar la ecuación de estado. Se parte de considerar a $V(x)$ como una función escalar diferenciable definida en un dominio D que contiene el origen. El método de Lyapunov plantea que la función $V(x)$ es definida positiva si $V(0) = 0$ y $V(x) > 0$ para todo valor de x . $V(x)$ es definida negativa si $V(0) = 0$ y $V(x) < 0$ para todo valor de x (Bartoszewicz, 2009; Slotine, 1991).

En este caso se seleccionó la función $V = \frac{1}{2}s^2$ debido a que es definida positiva y su derivada es definida negativa. Si se deriva la función candidata con respecto a la superficie deslizante $s(x, t)$ definida en la ecuación 2.3 es posible obtener una expresión para la ley

de control que se debe diseñar, asegurándose la estabilidad del sistema (Yoerger, 1985).

$$s\dot{s} \leq -F|s| \quad (2.4)$$

donde F representa una constante positiva. La ecuación 2.4 se puede escribir de manera simplificada como:

$$\text{sgn}(s)\dot{s} \leq -F \quad (2.5)$$

De esta manera se asegura que las trayectorias en un plano fase apunten hacia la superficie $s(x, t)$, y una vez dentro de la superficie, las trayectorias del sistema permanezcan sobre la misma, tal como se muestra en la figura 2-1. Adicionalmente, esto implica que algunas perturbaciones o incertidumbres dinámicas puedan ser toleradas siempre y cuando la superficie no sufra variación (Ming, 1997).

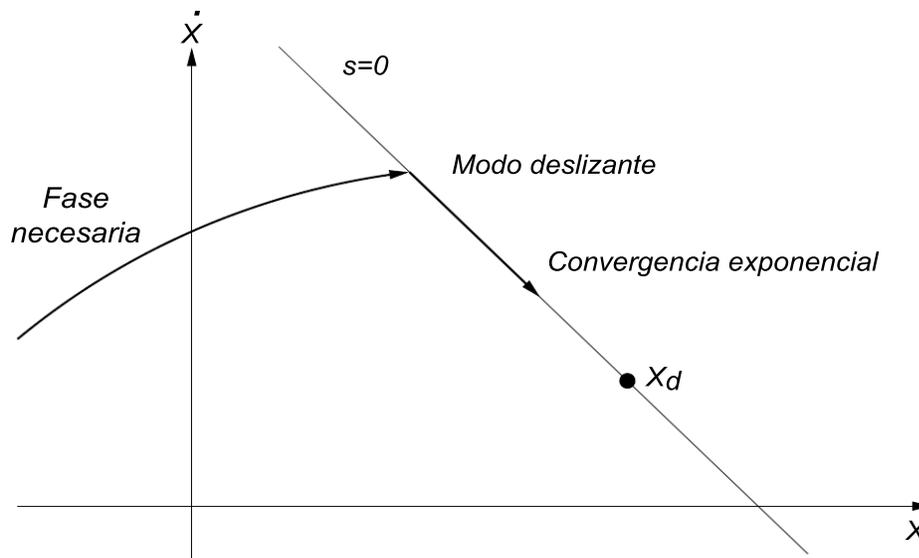


Figura 2-1: Efecto del control en modo deslizante sobre la trayectoria de un sistema de segundo orden representado en espacio estado.

En resumen, la idea es utilizar una función conocida para $s(x, t)$ acorde a 2.3, y entonces seleccionar la ley de control $U(t)$ en 2.1 de manera tal que el sistema en lazo cerrado mantenga el comportamiento definido por la superficie deslizante seleccionada, a pesar de la presencia de imprecisiones que contenga el modelo y el efecto de las perturbaciones.

2.3. Diseño del controlador

La señal de mando $U(t)$ del control en modo deslizante está integrada por dos partes:

$$U(t) = U_c(t) + U_d(t) \quad (2.6)$$

$U_c(t)$: Mando compensado, tiene como función cancelar las no linealidades y los parámetros con incertidumbres del modelo.

$U_d(t)$: Mando discontinuo, asegura la robustez del sistema.

La ley de control $U_c(t)$ se implementa para cumplir con la condición deslizante expresada por la ecuación 2.9. El término discontinuo $U_d(t)$ se justifica debido a que la implementación de la conmutación de control es imperfecta, lo que conduce al *chattering*. El *chattering* es indeseable en la práctica puesto que provoca una alta acción de control que estará afectada por términos dinámicos de alta frecuencia que no se hayan tenido en cuenta en el modelado (Ming, 1997).

De acuerdo con la estructura de la ecuación 2.1 la dinámica de un sistema de segundo orden puede expresarse como (Yoerger, 1985):

$$\ddot{x} = b(x, t)[f(x, t) + U(t) + d(t)] \quad (2.7)$$

Como se definió anteriormente, el término $f(x, t)$ es no lineal y variable en el tiempo y una vez estimado a partir del modelo se puede expresar como $\hat{f}(x, t)$.

El error que se produce debido a la estimación de $f(x, t)$ está dado por:

$$\left| \hat{f}(x, t) - f(x, t) \right| \leq G(x, t)$$

siendo $G(x, t)$ una función conocida.

Por su parte el término $b(x, t)$ puede variar dentro de un rango determinado por:

$$0 \leq b_{\min}(x, t) \leq b(x, t) \leq b_{\max}(x, t)$$

De ahí que $b(x, t)$ puede ser estimado con un nivel de exactitud razonable utilizando solo los valores mínimos y máximos del mismo (Yoerger, 1985).

$$\hat{b}(x, t) = \sqrt{b_{\min}(x, t)b_{\max}(x, t)}$$

La derivada de la superficie deslizante definida por la ecuación 2.3 en función del error está dada por:

$$\dot{s}(t) = (\ddot{x}_d(t) - \ddot{x}(t)) + \lambda(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (2.8)$$

Al sustituir la ecuación 2.8 en la ecuación 2.5, y teniendo en consideración que $\ddot{x}_d(t) = \dot{x}_d(t) = 0$, se llega a la siguiente expresión:

$$\text{sgn}(s)\{\ddot{x} + \lambda\dot{x}\} \geq F$$

Teniendo en cuenta que la ecuación 2.7 define la dinámica de un sistema de segundo orden, es posible reescribir la expresión anterior a partir de los términos estimados que definen a \ddot{x} como:

$$\text{sgn}(s)\{b(x, t)[\hat{f}(x, t) + U(t) + d(t)] + \lambda\dot{x}\} \geq F \quad (2.9)$$

Esta expresión constituye la condición deslizante que debe cumplirse para asegurar el desempeño adecuado del sistema.

La ecuación para el mando compensado de un control deslizante, encargado de cancelar las no linealidades e incertidumbres de un sistema de segundo orden, se obtiene a partir de la ecuación 2.7 y se define como:

$$U_c(t) = \hat{b}(x, t)^{-1}[-d(t)\hat{b}(x, t) - \hat{f}(x, t)\hat{b}(x, t) - \lambda\dot{x}] \quad (2.10)$$

Para asegurar que la condición deslizante, expresada por la ecuación 2.9, se cumpla en todo momento es necesario implementar una ley de control que cumpla con la siguiente

estructura (Yoerger, 1985):

$$U(t) = U_c(t) + k(x, t)sgn(s) \quad (2.11)$$

donde $k(x, t)$ se selecciona tal que:

$$k(x, t) = G(x, t) + F$$

siendo $G(x, t)$ una función conocida.

Por su parte el término discontinuo $sgn(x)$ se define como:

$$sgn(x) = 1 \quad \text{para } x > 0$$

$$sgn(x) = -1 \quad \text{para } x \leq 0$$

La ley de control expresada por la ecuación 2.11 asegura que la trayectoria del sistema alcance en un tiempo finito la superficie deslizante $s(t)$, asegurando que los errores tiendan exponencialmente a cero.

El procedimiento para arribar a la expresión de la ley de control no ha sido muy complejo debido a que la superficie deslizante seleccionada es de primer orden. Para superficies de mayor orden la complejidad aumenta considerablemente (Ming, 1997; Bartoszewicz, 2009).

2.4. Chattering

El término *chattering* describe las señales oscilantes de frecuencia y amplitud finita que aparecen en las implementaciones en modos deslizantes producto a la rápida conmutación del controlador en modo deslizante resaltando las características dinámicas sin modelar del lazo de control (Ming, 1997). En la figura 2-2 se muestra la representación de la trayectoria de un sistema afectado por el fenómeno del *chattering*.

El *chattering* es indeseable y debe ser eliminado por el controlador si se quiere que el sistema mantenga un desempeño adecuado. En la literatura (Slotine, 1991) se reporta una solución que permite eliminar los efectos negativos que provoca el *chattering* en los

sistemas donde se aplica el control en modo deslizante (Yoerger, 1985; Akcakaya, 2009).

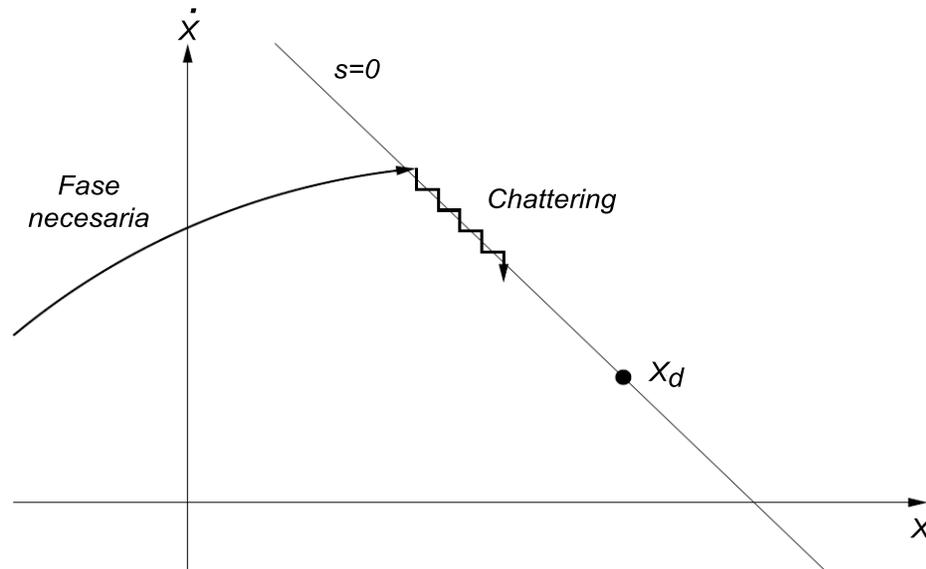


Figura 2-2: Representación del efecto chattering resultado de la acción del control deslizante.

La solución propuesta por estos autores consiste en reemplazar el término discontinuo $sgn(s)$ por una función de saturación definida por:

$$sat(x) = x, \text{ para } |x| \leq 1 \quad (2.12)$$

$$sat(x) = sgn(x) \text{ para } |x| \geq 1 \quad (2.13)$$

2.5. Consideraciones finales

El control en modo deslizante ofrece un adecuado tratamiento a las no linealidades e incertidumbres que suelen aparecer en los sistemas no lineales. El modelo dinámico de un vehículo autónomo subacuático es no lineal y se caracteriza por contener varios parámetros con un alto grado de incertidumbres. Las perturbaciones que afectan a estos vehículos son difíciles de estimar, lo cual incorpora mayor complejidad.

En este capítulo se presentaron los pasos que son necesarios seguir para diseñar un controlador en modo deslizante. Primero fue necesario establecer como estado deseado del sistema una superficie deslizante de primer orden. Utilizando el método de estabilidad propuesto por Lyapunov y teniendo en cuenta las características dinámicas de un sistema

no lineal fue posible establecer una ley de control que asegura que el sistema sea conducido a la superficie deslizante, y una vez alcanzada, se mantenga sobre la misma. Se presenta un método sencillo que permite reducir el fenómeno del *chattering*, el cual constituye la principal limitante de la estrategia de control deslizante. A partir de la metodología presentada se realizará el diseño para el HRC-AUV.

CAPÍTULO 3

CONTROL EN MODO DESLIZANTE APLICADO AL HRC-AUV

En este capítulo se presenta el diseño de un controlador en modo deslizante para controlar el rumbo del HRC-AUV. Para realizar el diseño es necesario contar con un modelo no lineal que contenga una representación dinámica del vehículo en función de los estados de interés. Los resultados satisfactorios del control deslizante se alcanzan con una correcta selección de la pendiente de la superficie deslizante y del valor de ganancia, así como con un tratamiento adecuado del fenómeno *chattering*. El controlador en modo deslizante debe ser capaz de asegurar un desempeño adecuado para un amplio rango de operación.

3.1. Modelo dinámico que describe el movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal

El modelo dinámico es indispensable para el adecuado diseño de una estrategia de control. En el caso del HRC-AUV se cuenta con un modelo no lineal de 6 GDL (Cañizares, 2010). A partir de este modelo es posible obtener representaciones dinámicas simplificadas del movimiento del vehículo en los distintos planos. En este epígrafe se presenta el modelo dinámico no lineal que caracteriza el movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal. Este modelo se utilizará en el diseño de un controlador deslizante para mantener en un valor deseado el rumbo del vehículo.

3.1.1. Sistemas de coordenadas

El movimiento de un submarino en el mar se describe respecto a un sistema de referencia inercial. Debido a que la rotación de la Tierra afecta muy poco a los vehículos marinos de baja velocidad puede considerarse que un sistema de referencia situado en tierra (OE) es un sistema inercial cuyos ejes de coordenadas $x - y - z$ están direccionados hacia el Norte, el Este y centro de la Tierra respectivamente (Fossen, 1994).

La Figura 3-1 muestra la notación para los movimientos de rotación y traslación del vehículo referidos a (OE) (Fossen, 1994). Las velocidades lineales y angulares están referidas a un sistema de coordenadas situado en el móvil (OB).

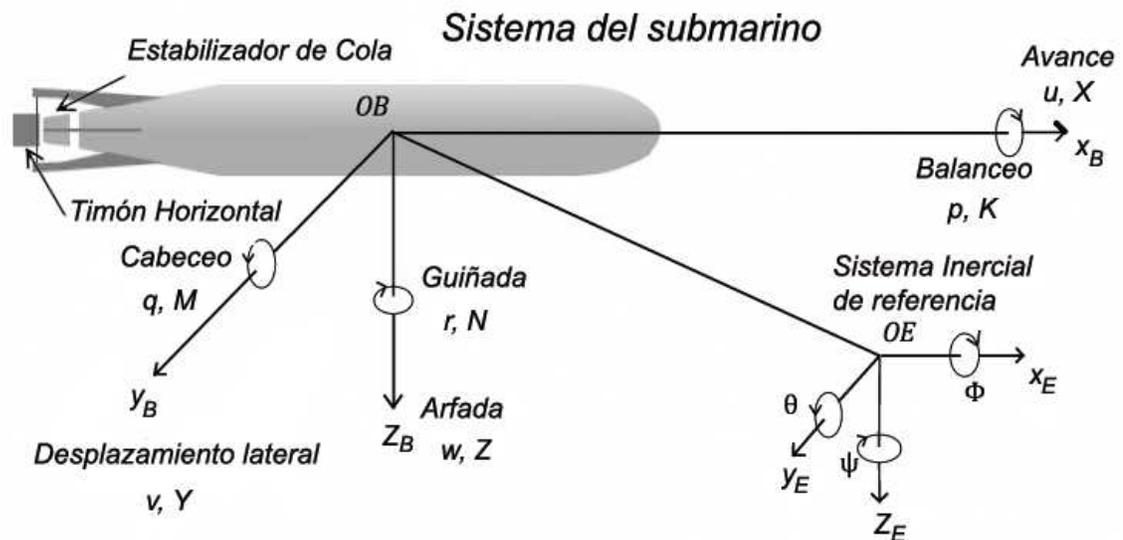


Figura 3-1: Sistemas de coordenadas para un AUV con la definición de ángulos y velocidades.

El origen del sistema de coordenadas del HRC-AUV se eligió coincidiendo con el Centro de Flotabilidad (CB), aprovechando que usualmente tanto el Centro de gravedad (CG) como el (CB) están situados en los planos de simetría del vehículo.

En el Tabla 3-1 se resume la nomenclatura utilizada para describir el movimiento del vehículo, las fuerzas y momentos.

3.1.2. Ecuaciones dinámicas utilizadas en el modelado

Las ecuaciones que describen el movimiento del vehículo en el espacio tridimensional pueden obtenerse a partir de las leyes de conservación de los momentos lineales y

Tabla 3–1: Nomenclatura utilizada en el HRC-AUV.

Traslación	Fuerza	Velocidad lineal	Posición
Avance	X	u	x
Desplazamiento lateral	Y	v	y
Arfada	Z	w	z
Rotación	Momento	Velocidad angular	Ángulo
Balanceo	K	p	ϕ
Cabeceo	M	q	θ
Guiñada	N	r	ψ

angulares referidos a un sistema inercial de referencia. Fossen (Fossen, 1994, 2002, 2006, 2011) demuestra que la segunda ley de Newton puede expresarse para cualquier vehículo subacuático con un sistema de coordenadas fijo al cuerpo de la forma:

$$\underbrace{M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu}_{\text{términos del cuerpo rígido}} + \underbrace{M_A\dot{\nu} + C_A(\nu)\nu + D(\nu)\nu}_{\text{términos hidrodinámicos}} + \underbrace{g(\eta)}_{\text{términos hidrostáticos}} = \tau \quad (3.1)$$

La ecuación (3.1) se puede representar de forma compacta como:

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

donde $M = M_{RB} + M_A$ es la matriz de inercia (incluida las masas añadidas) determinada a partir de la configuración de simetría del vehículo y considerando la estructura del AUV similar a un elipsoide alargado con distribución de masa uniforme. $C(\nu)$ representa la matriz de Coriolis incluyendo las masas añadidas. La matriz de amortiguamiento $D(\nu)$ está dada por $-diag\{X_u, Y_\nu, Z_w, K_p, M_q, N_r\}$. El vector de momentos gravitacionales y de flotabilidad, $g(\eta)$, depende de la distancia entre el CB y el CG ; $BG = [BG_x, BG_y, BG_z]^T$. Finalmente $\tau = [\tau_X, \tau_Y, \tau_Z, \tau_K, \tau_M, \tau_N]^T$ es el vector de entradas de control.

Los términos de la ecuación 3.1 que caracterizan la dinámica del movimiento en el plano horizontal del HRC-AUV son de orden 3. Los estados de interés en este plano son la posición lineal (x), la posición lineal (y) y la posición angular (ψ), de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 3–1. Este modelo simplificado de 3 GDL continuará siendo no lineal y será el que se tomará como base para el diseño del control.

Los parámetros del modelo dinámico de 3 GDL no lineal para el movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal pueden ser calculados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$M_A = -diag\{X_{\dot{\nu}}, Y_{\dot{\nu}}, N_{\dot{r}}\} \quad (3.4)$$

$$C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m\nu \\ 0 & 0 & mu \\ m\nu & -mu & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{\nu}}\nu \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ -Y_{\dot{\nu}}\nu & X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$D(\nu) = -diag\{X_u + X_{u|u|}, Y_{\nu}, N_r\} \quad (3.7)$$

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta T \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Las componentes del vector $g(\eta)$ para los estados (x, y, ψ) son cero.

De esta manera es posible calcular todos los términos del modelo de 3 GDL que describe la dinámica del movimiento del HRC-AUV en el plano horizontal.

3.1.3. Comportamiento del modelo dinámico del HRC-AUV en el plano horizontal

El HRC-AUV tiene una estructura física similar al “LAUV” (daSilva, 2007), aunque con mayores dimensiones; es de forma cilíndrica y presenta simetría en sus tres planos. En el Anexo A se presentan los valores geométricos, inerciales y experimentales del vehículo (Valeriano, 2011).

Por su parte, las fuerzas de control son provocadas por las entradas de control (u) dependiendo del tipo de actuador. Las características de los actuadores instalados en el HRC-AUV se muestran en la tabla 3–2. En el movimiento del vehículo en el plano horizontal solo intervienen la hélice ($|n|n$) y el timón de cola (δ_T). El brazo del momento provocado por la ubicación de los actuadores con respecto al origen del sistema de referencia OB , se define mediante el siguiente vector $\mathbf{r} = [l_x, l_y, l_z]^T$. Para el caso del HRC-AUV $\mathbf{r} = \mathbf{r}_H = \mathbf{r}_T = \mathbf{r}_E = [4\text{ m}, 0, 0\text{ m}]^T$.

Tabla 3–2: Actuadores y variables de control del HRC-AUV.

Actuador	u	f^T
Hélice	$ n n$	$[\tau_X, 0, 0]$
Timón de cola	<i>ángulo de deflexión</i> (δ_T)	$[0, \tau_Y, 0]$
Estabilizador de cola	<i>ángulo de deflexión</i> (δ_E)	$[0, 0, \tau_Z]$

Para el cálculo de las masas añadidas se utilizó la aproximación del vehículo a un esferoide alargado (Cañizares, 2010), obteniéndose los valores: $X_{\dot{u}} = -250,84\text{ Kg}$, $Y_{\dot{v}} = -3\ 834\text{ Kg}$, $N_{\dot{r}} = -15\ 572\text{ Kg m}^2$.

Los términos pertenecientes a la matriz de amortiguamiento ($D(\nu)$) y al vector de entradas de control (τ) se estimaron a partir de experimentos realizados con el HRC-AUV. La descripción y los resultados obtenidos en estos experimentos han sido presentados por GARP en investigaciones anteriores (Cañizares, 2010; Martínez, 2010; Valeriano, 2011). Los valores de los parámetros estimados se presentan en el Anexo A.

A partir de los datos geométricos, inerciales y experimentales del HRC-AUV y utilizando las ecuaciones 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 fue posible calcular todos los términos de la ecuación 3.1.

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} 4094,56 & 0 & 0 \\ 0 & 4094,56 & 0 \\ 0 & 0 & 20816 \end{bmatrix} \quad C_{RB}(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4094,56\nu \\ 0 & 0 & 4094,56u \\ 4094,56\nu & -4094,56u & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_A = -diag\{-250,84, -3834, -15572\} \quad D(\nu) = -diag\{-228,94, -1219,8, -9096,9\}$$

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -3834\nu \\ 0 & 0 & 250,84u \\ 3834\nu & -250,84u & 0 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1946 & 0 \\ 0 & 318,39 \\ 0 & 1273,56 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta T \end{bmatrix}$$

Al contar con todos los parámetros del modelo de 3 GDL del vehículo, se procedió a analizar mediante simulación su comportamiento. Para ello se utilizó el toolbox *MSS* (Perez, 2009) previamente añadido al *MATLAB*.

El procedimiento consiste en despejar la derivada del vector velocidad (aceleración) en la ecuación 3.1, quedando en función de las matrices de inercia del cuerpo rígido, los términos de *Coriolis* y de amortiguamiento del vehículo, así como del vector de entradas de control. Al integrar se obtiene el vector velocidad y al integrar nuevamente se obtiene el vector de posición y orientación del vehículo.

El HRC-AUV, debido a su dinámica, presenta un comportamiento inestable en el plano $x-y$, por lo que si se somete a una variación angular constante del timón horizontal debe realizar una trayectoria de forma circular. Precisamente eso fue lo que se realizó en la simulación, lográndose como resultado la gráfica de la figura 3-2.

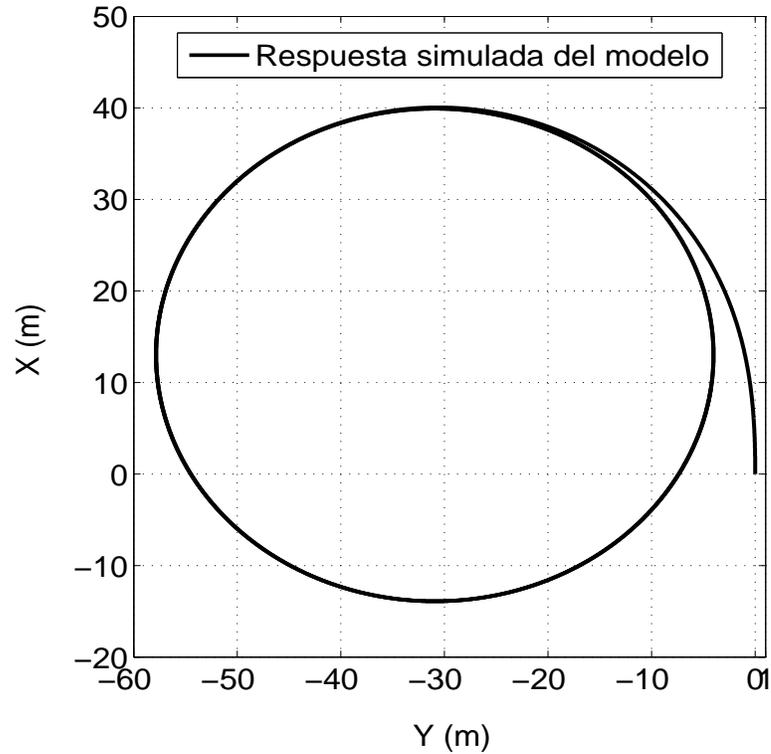


Figura 3-2: Comportamiento del modelo dinámico de 3 GDL del HRC-AUV.

De esta manera se demuestra que el comportamiento del modelo dinámico de 3 GDL presentado en esta sección es adecuado y puede ser utilizado como base para el diseño del control deslizante.

3.2. Diseño del controlador deslizante para el HRC-AUV.

El control en modo deslizante se diseña con el objetivo de controlar el rumbo ψ del vehículo, para ello se utiliza el modelo no lineal de 3 *GDL* presentado en la Sección 3.1.

La representación dinámica del ψ del HRC-AUV se corresponde con la de un sistema de segundo orden, por lo que la ecuación 2.7 puede ser reescrita en función del ángulo de guiñada del vehículo como:

$$\ddot{\psi} = \hat{b}(\psi, t)[\hat{f}(\psi, t) + U(t) + d(t)] \quad (3.9)$$

En AUVs el término $\hat{b}(\psi, t)$ se define como el recíproco de los momentos de inercia y las masas añadidas del vehículo, mientras que $\hat{f}(\psi, t)$ contiene los parámetros relacionados con el amortiguamiento viscoso, por lo que a partir de la estructura del modelo dinámico del HRC-AUV es posible establecer las siguientes relaciones en función del ángulo de

guiñada del vehículo:

$$\hat{b}(\psi, t) = \frac{b_5}{I_{zz} - N_{\dot{r}}} \quad (3.10)$$

$$\hat{f}(\psi, t) = \frac{N_r}{I_{zz} - N_{\dot{r}}} \quad (3.11)$$

El término $d(t)$ se considerará cero debido a que no se tendrán en cuenta el efecto de las perturbaciones.

La metodología de diseño del control en modo deslizante consiste en implementar una señal de control ($U(t)$) que sea capaz de cancelar los elementos menos conocidos del modelo y aquellos que representan las no linealidades del sistema ($\hat{b}(\psi, t)$ y $\hat{f}(\psi, t)$) (Yoerger, 1985).

3.2.1. Selección de la superficie deslizante

El problema a resolver por el control es que el estado ψ sea similar al estado deseado ψ_d previamente definido en presencia de incertidumbres dinámicas (Ming, 1997). El error del sistema se define entonces como:

$$\tilde{\psi} = \psi_d - \psi \quad (3.12)$$

El estado deseado del sistema se alcanza cuando la superficie deslizante es cero ($s(\psi, t) = 0$). Esto implica que $\tilde{\psi} \rightarrow 0$ una vez que la trayectoria del sistema alcance la superficie deslizante. En ese momento se logra que el desempeño del sistema no se vea afectado por las no linealidades.

Para sistemas de segundo orden y teniendo en cuenta lo expresado en la sección 2.2, es posible expresar la ecuación 2.3 que define la superficie deslizante como (Ming, 1997):

$$s(\psi, t) = \dot{\tilde{\psi}} + \lambda\tilde{\psi} \quad (3.13)$$

que se corresponde con una recta de pendiente λ que intercepta el punto de operación deseado del sistema $(\psi_d, \dot{\psi}_d)$. La dinámica deseada se alcanza cuando:

$$0 = \dot{\tilde{\psi}} + \lambda\tilde{\psi}$$

de manera que $\psi(t) = \psi(0)e^{\lambda t}$.

Para este diseño se escogió como pendiente de la superficie deslizante ($\lambda = 0,12$).

3.2.2. Ley de control

La ley de control a implementar debe cumplir con la condición expresada por la ecuación 2.9. Atendiendo a las características dinámicas del HRC-AUV expresadas en función del ángulo de guiñada del vehículo, es posible proponer una expresión para la señal de control $U(t)$ acorde a la ecuación 2.11.

En tal sentido, la expresión de la señal de mando que es necesaria aplicar al sistema para cancelar los términos pobremente conocidos y las no linealidades del modelo y que además asegure la estabilidad y mantenga el rumbo del vehículo, está dada por la siguiente expresión:

$$U(t) = \frac{-\hat{b}(\psi, t)\hat{f}(\psi, t) - \lambda\dot{\psi}}{\hat{b}(\psi, t)} + K\text{sgn}(s) \quad (3.14)$$

Esta expresión se implementó en el *Simulink* de *MATLAB*, eligiéndose para el diseño un valor de ganancia ($K = 1000$) que asegurara la robustez del sistema. Los valores de $\hat{f}(\psi, t)$ y $\hat{b}(\psi, t)$ se estimaron en base a los parámetros del modelo y el valor de λ de la superficie se seleccionó igual a 0,12. En la figura 3-3 se presenta la estructura de control implementada en *Simulink*.

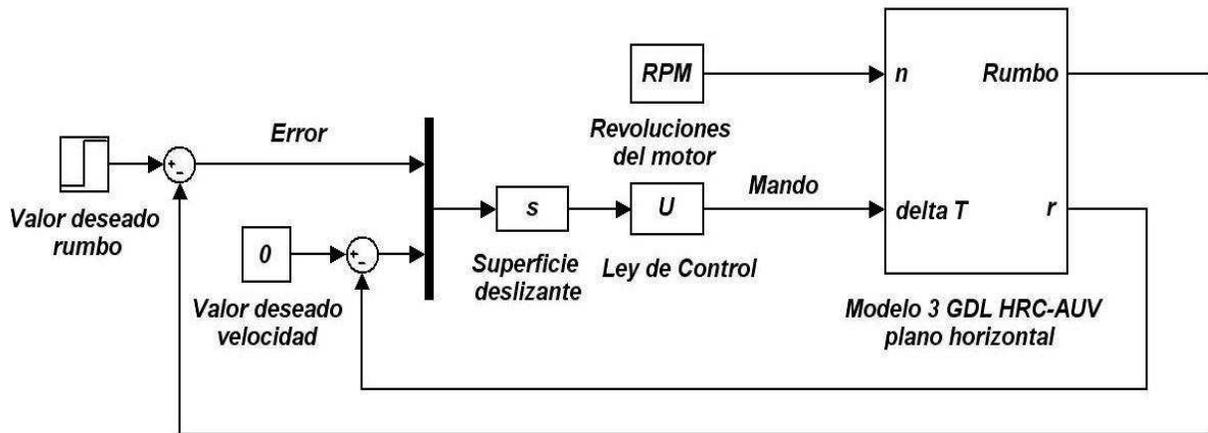


Figura 3-3: Esquema de control.

3.2.3. Resultados del diseño

En la figura 3-4 se muestra la respuesta del sistema con el controlador de rumbo en modo deslizante diseñado en la sección anterior. Como se puede apreciar, el comportamiento del sistema es adecuado, similar al de un sistema de primer orden, y el valor deseado del rumbo (1 rad) se alcanza en un tiempo aproximado de 32 segundos ($t_s \approx 32 \text{ seg.}$). El tiempo de subida de la respuesta es de $18,3 \text{ segundos}$ ($t_r \approx 18,3 \text{ seg.}$).

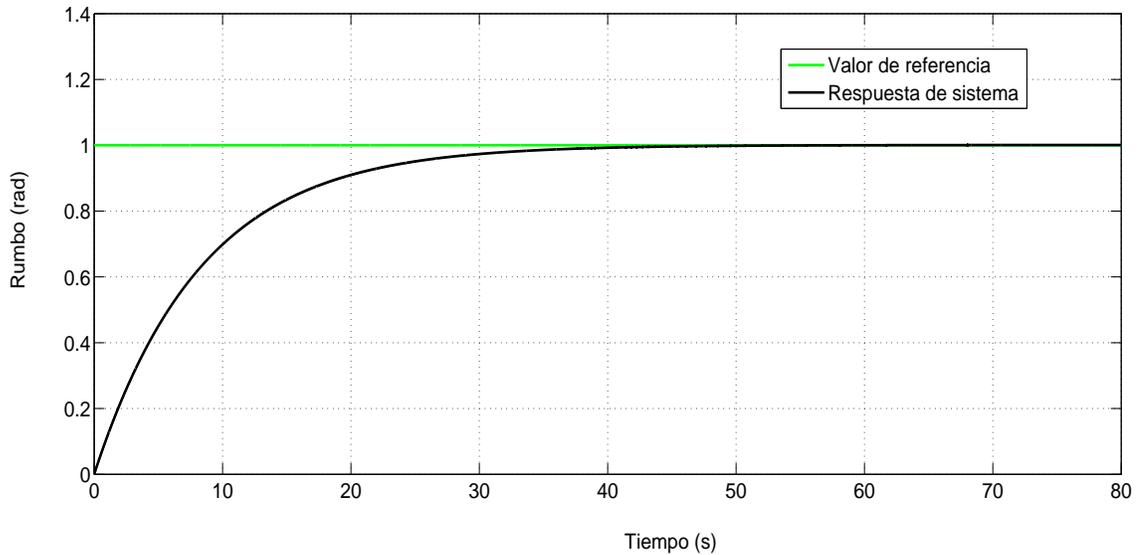


Figura 3-4: Respuesta de rumbo ante entrada tipo paso por la referencia.

Por su parte, en la figura 3-5 se presenta el comportamiento de la señal de mando del sistema. Se puede apreciar cómo aparecen oscilaciones constantes en el mando, que son el resultado del fenómeno del *chattering*.

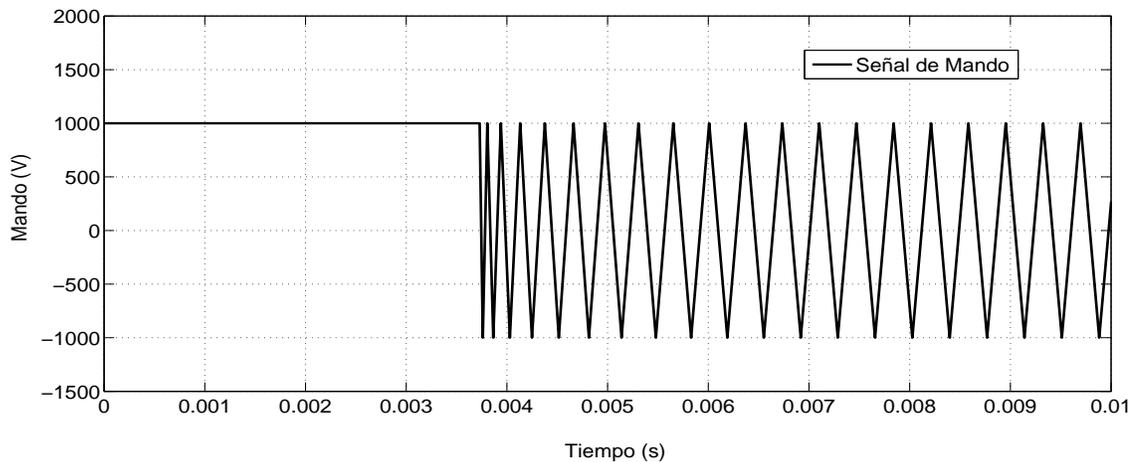


Figura 3-5: Señal de mando afectada por el chattering.

Como se había expresado anteriormente, el efecto *chattering* es indeseado en el control deslizante, por lo que es necesario eliminarlo. Para ello se implementó la solución propuesta por varios autores (Yoerger, 1985; Slotine, 1991; Ming, 1997; Akcakaya, 2009) y abordada en la sección 2.4, que consiste en sustituir el término discontinuo $sgn(s)$ por una función de saturación que para este caso tiene como valores límites -1 y 1.

En la figura 3-6 se presenta la respuesta del sistema una vez aplicada esta solución. Por su parte, en la figura 3-7 se presenta la acción de mando correspondiente.

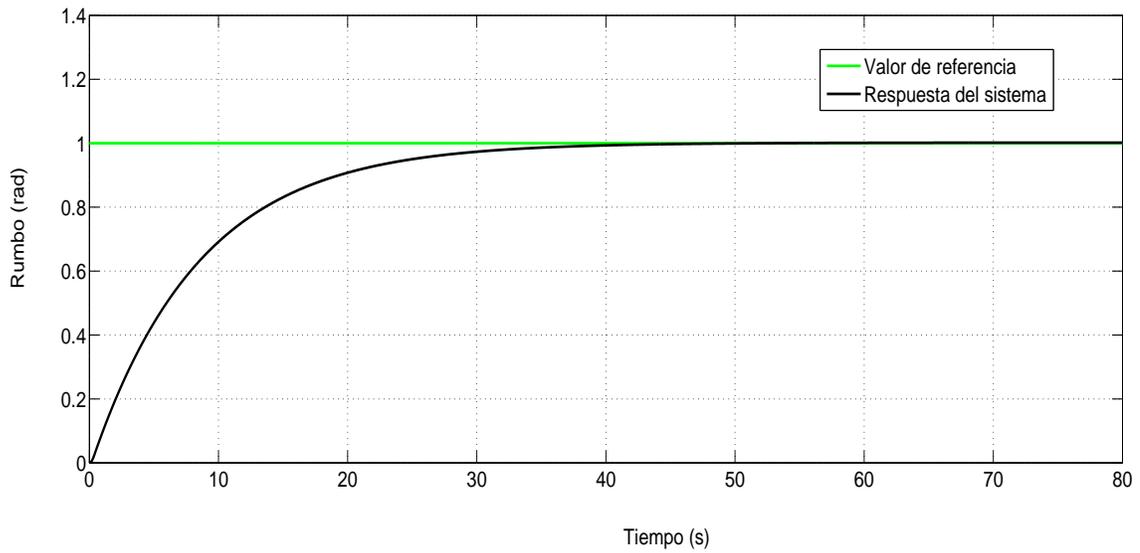


Figura 3-6: Respuesta de rumbo ante entrada tipo paso por la referencia.

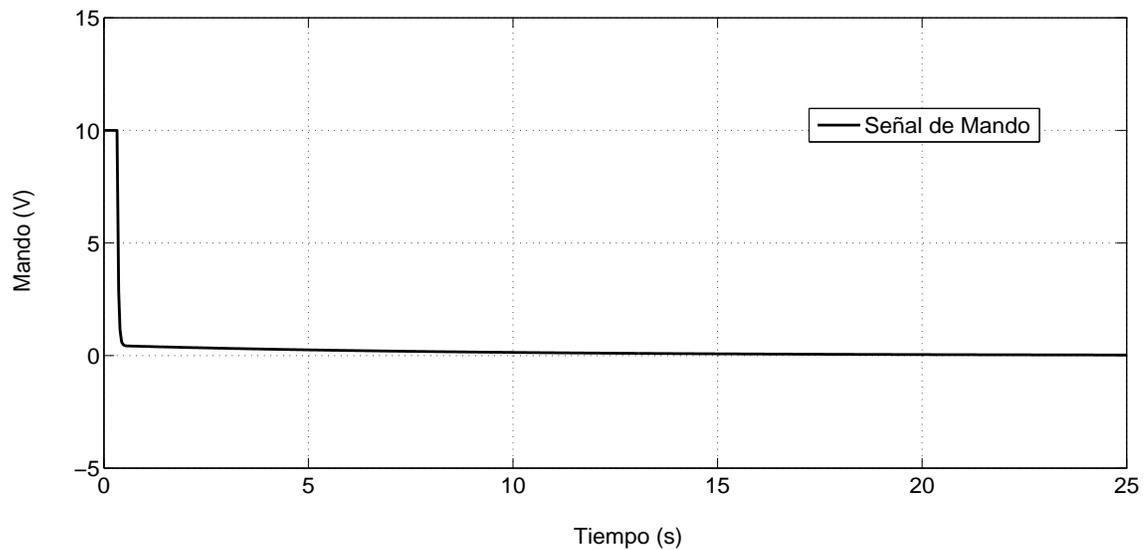


Figura 3-7: Señal de mando sin chattering.

Se puede apreciar claramente cómo la solución aplicada elimina el efecto del *chattering* sin afectar la calidad de la respuesta del sistema.

3.3. Evaluación del diseño

En esta sección se pretende demostrar la calidad del diseño del control en modo deslizante aplicado al rumbo del HRC-AUV. Para ello se tomará como base los resultados de la estrategia de control convencional diseñada por GARP (Cañizares, 2010; Zamora, 2011; Hernández, 2011) y que ha sido evaluada mediante pruebas realizadas en el mar con el vehículo.

La estrategia convencional para el control de rumbo empleada en el HRC-AUV está basada en un controlador PI-D diseñado a partir de una función de transferencia linealizada alrededor de un punto de operación. La función de transferencia linealizada utilizada para el ajuste del controlador ha sido presentada por GARP en otras investigaciones (Cañizares, 2010; Zamora, 2011; Hernández, 2011). El punto de operación se estableció considerando como velocidad de avance del vehículo ($u = 1,9m/s$) y las demás velocidades como cero. En esta simplificación como es lógico no se tienen en cuenta las no linealidades del sistema.

La figura 3–8 muestra la respuesta simulada del sistema de control convencional PI-D ante una entrada tipo paso de magnitud 30 grados en el valor deseado del rumbo.

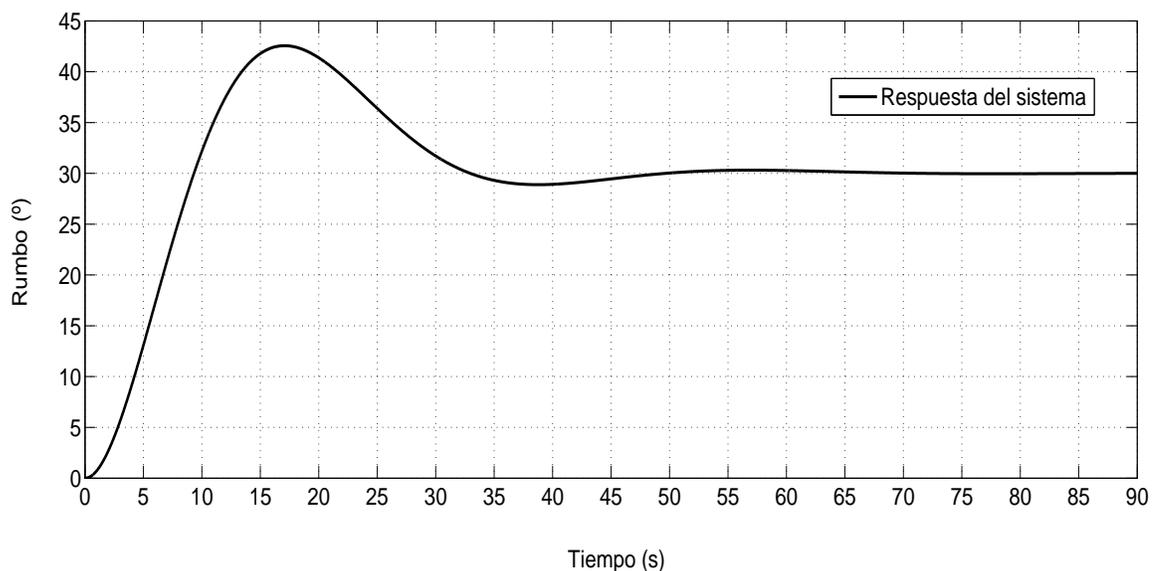


Figura 3–8: Respuesta de rumbo del controlador PI-D ante entrada tipo paso por la referencia.

La respuesta es adecuada porque los valores de los parámetros que la definen (M_p , t_r y t_s) se encuentran dentro del rango de lo permisible ($M_p \approx 41\%$, $t_r \approx 9,31 \text{ seg.}$ y $t_s \approx 45 \text{ seg.}$).

Al aplicar la misma señal de entrada al sistema de control de rumbo en modo deslizante del HRC-AUV presentado en la sección 3-9 se obtuvo la respuesta que se muestra en la Figura 3-9.

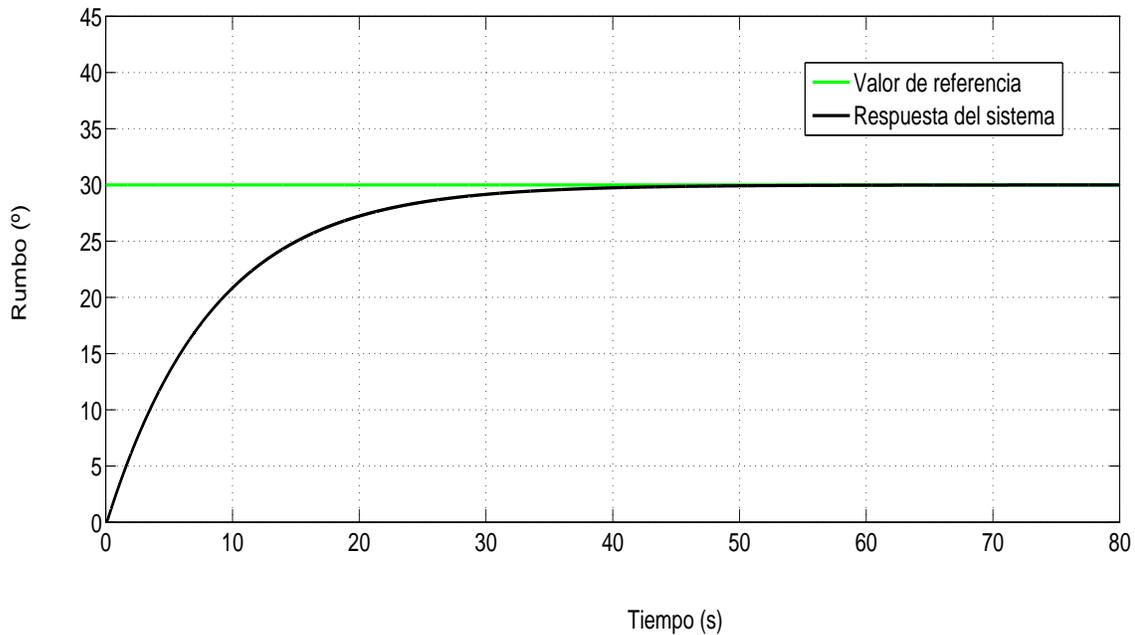


Figura 3-9: Respuesta de rumbo del controlador en modo deslizante ante entrada tipo paso por la referencia.

Para este caso el desempeño de la respuesta también es adecuado, se estabiliza más rápido ($t_s \approx 32,7 \text{ seg.}$) pero el tiempo de subida es más elevado ($t_r \approx 24 \text{ seg.}$) y se comporta similar al de un sistema de primer orden debido a que la superficie deslizante que define el estado deseado está dada por la ecuación de una recta.

El control en modo deslizante se justifica debido a que logra un desempeño similar al de una estrategia de control convencional pero sin la limitante de que puede ser aplicado solo para un rango de operación determinado. Además, el control de rumbo en modo deslizante se diseñó teniendo en cuenta el efecto de las no linealidades y las incertidumbres del sistema, no siendo esto así para el caso del control convencional, lo cual le asegura al control deslizante una mayor robustez.

3.4. Análisis económico

Los vehículos autónomos subacuáticos están valorados entre 1,5 y 2 millones de dólares estadounidenses (USD) (Wernli, 2000), en dependencia de la calidad del vehículo, de los sensores y equipamiento instalado, y de la aplicación a la que se destine. Normalmente se comercializa el vehículo de manera conjunta con el autopiloto diseñado, lo cual representa que el cliente no podrá acceder a la información necesaria para replicar o reparar el AUV, aumentándose el valor agregado del vehículo.

El costo de producción del HRC-AUV es mucho menor que el de los AUVs que se comercializan actualmente en el mundo. El HRC-AUV es un vehículo de bajo costo que ha sido totalmente diseñado y construido en Cuba. Todo el equipamiento de hardware y sensores instalados clasifican en la gama baja que proporcionan sus fabricantes, por ejemplo, el sensor inercial instalado en el HRC-AUV (MTI-G de Xsens) está valorado en 5 069 USD, mientras uno de los utilizados por el proyecto *HUGIN* se cotiza en 9 000 USD. Como se puede apreciar, la diferencia en precio, en calidad y prestaciones es notable.

Para suplir las deficiencias que provoca el sistema de bajo costo instalado, los miembros de GARP y CIDNAV han tenido que adoptar soluciones ingenieriles basadas fundamentalmente en técnicas de modelado que han requerido un esfuerzo adicional. La solución de control propuesta en esta investigación sin dudas contribuye a elevar el desempeño del HRC-AUV y a disminuir la brecha en cuanto a prestaciones en relación con otros AUVs de mayor costo. Esto reafirma que el peso fundamental del costo de una aplicación de la rama recae en el diseño ingenieril del sistema. Lamentablemente en Cuba no se aplican técnicas que permitan evaluar el costo que implica el dominio del conocimiento.

El proyecto HRC-AUV demuestra que es posible realizar en Cuba aplicaciones de este tipo que solo son reportadas en países del primer mundo. El HRC-AUV contribuye a la independencia tecnológica del país.

3.5. Consideraciones finales

El diseño del control de rumbo en modo deslizante para el HRC-AUV se realizó tomando como base el modelo no lineal de 3 GDL que caracteriza el comportamiento del vehículo en el plano horizontal. Para la obtención de la ley de control se siguieron los pasos establecidos en el Capítulo 2. El objetivo de la ley de control es cancelar los parámetros no lineales y con incertidumbres del modelo; el valor de ganancia y la pendiente de la superficie deslizante seleccionados aseguran la robustez y rapidez en la respuesta del sistema respectivamente; la superficie deslizante considerada asegura que el comportamiento de la respuesta sea similar a la de un sistema de primer orden.

El diseño realizado se implementó en el *MATLAB* y su desempeño fue evaluado mediante simulación. Una solución práctica se agregó a la ley de control con el objetivo de eliminar el *chattering* en la respuesta. La respuesta obtenida con el control de rumbo en modo deslizante presenta un comportamiento similar a un sistema de primer orden, es estable y no está afectada por el *chattering*. Al realizar un análisis de los resultados obtenidos con el diseño realizado y tomando como base la respuesta de un controlador convencional de rumbo tipo PI-D, se demostró que el control en modo deslizante asegura un desempeño adecuado para el sistema en un amplio rango de operación e independientemente de las no linealidades presentes. Por último, se presentó el análisis económico que demuestra la viabilidad económica de la investigación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Esta investigación forma parte del proyecto HRC-AUV en la temática del diseño del control para el autopiloto del vehículo. Con este trabajo comienza el estudio y evaluación de estrategias de control no convencionales con el propósito de asegurar un mejor desempeño del vehículo. Los principales resultados obtenidos se exponen a manera de conclusiones:

- En investigaciones anteriores realizadas por GARP se evidenció la necesidad de contar con una estrategia de control no lineal que eliminara el efecto de las no linealidades y las incertidumbres que caracterizan la dinámica del HRC-AUV. Es por eso que en este trabajo se diseña una estrategia de control de rumbo en modo deslizante. La selección de la estrategia de control en modo deslizante es resultado del análisis de una amplia revisión bibliográfica realizada.
- La metodología para el diseño del control en modo deslizante empleada establece como estado deseado del sistema una superficie deslizante de primer orden. La estabilidad del diseño realizado se analizó utilizando el método de estabilidad de *Lyapunov*. La ley de control obtenida asegura que el comportamiento del sistema sea el establecido por la superficie deslizante seleccionada. Se introdujo una solución práctica en la ley de control con el objetivo de eliminar el efecto del *chattering*.
- Los resultados del diseño realizado fueron evaluados mediante simulación. La respuesta del rumbo obtenida a partir de la implementación de la ley de control en modo deslizante es estable, con un comportamiento similar al de un sistema de primer orden y sin la afectación del *chattering*.
- La capacidad que tiene el control en modo deslizante de asegurar un adecuado desempeño en un amplio rango de operación quedó demostrada. La respuesta obtenida con el control de rumbo en modo deslizante presenta un comportamiento similar que la de un control

convencional tipo PI-D, pero no está determinada por un rango de operación único. Además, no presenta picos en la respuesta y se estabiliza más rápido.

Con el presente trabajo de diploma queda demostrado que soluciones de control adecuadas son capaces de contrarrestar las inexactitudes y bajas prestaciones de una arquitectura sensorial de bajo costo.

Recomendaciones

Para establecer la necesaria continuidad que debe tener este trabajo se recomienda lo siguiente:

1. Implementar la estrategia de control presentada en esta investigación en el HRC-AUV y probar su comportamiento en pruebas experimentales en el mar.
2. Evaluar el desempeño de la ley de guiado implementada en el HRC-AUV utilizando el control de rumbo en modo deslizante presentado en esta investigación.
3. Utilizar los resultados de la presente investigación como material bibliográfico para estudiantes y profesores de la carrera de Automática y miembros del GARP, tomándola como referente para posteriores investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, G.G.; Calvo, O.A. (2008). Vehículo autónomo submarino para la inspección de tuberías y cables. In: *V Jornadas Argentinas de Robótica (JAR08)*. Universidad Nacional del Sur. IEEE CIS. Bahía Blanca, Argentina.
- Akcakaya, H.; Yildiz, H.A.; Saglam G.; Gurleyen F. (2009). Sliding mode control of autonomous underwater vehicle. In: *Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*. IEEE Xplore. Bursa, Turquía. pp. II-332 – II-336.
- Andonian, M.; Cazzaro, D.; Invernizzi L.; Chyba M.; Grammatico S. (2010). Geometric control for autonomous underwater vehicles: overcoming a thruster failure. In: *49th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE Xplore. Atlanta, Estados Unidos. pp. 7051–7056.
- Antonelli, C.; Chiaverini, S.; Sarkar Ch.; West M (2001). Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: Experimental results on odin. *IEEE Transactions on Control System Technology* **9**(5), 756–765.
- Antonelli, G.; Fossen, T.I.; Yoerger D. (2008). *Handbook of Robotics*. Chap. Underwater Robotics, pp. 987–1008. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlín, Alemania.
- Arslan, M.; Fukushima, N.; Hagiwara I. (2008). *Underwater Vehicles*. Chap. Optimal Control of Underactuated Underwater Vehicles with Single Actuator, pp. 19–32. I-Tech. Viena, Austria.
- Bartoszewicz, A.; Nowacka-Leverton, A. (2009). Time-varying sliding modes for second and third order systems. In: *Lecture Notes in Control and Information Sciences* (F.; Morari M. Thoma, M.; Allgower, Ed.). pp. 1–200. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlín, Alemania.
- Blidberg, R.D. (2001). The development of autonomous underwater vehicles (auv); a brief summary. In: *ICRA Conference*. AUVSI. Seúl Korea del Sur.

- Cañizares, J.R. (2010). Modelado y Control del Vehículo Autónomo Sumergible del CID-NAV. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Chang, W.; Chang, W.; Liu H. (2003). Model-based fuzzy modeling and control for autonomous underwater vehicles in the horizontal plane. *Journal of Marine Science and Technology* **11**(3), 155–163.
- daSilva, J. E.; Terra, B.; Martins R.; deSousa J. B. (2007). Modeling and simulation of the LAUV autonomous underwater vehicle. In: *13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. IEEE Control Systems Society.
- Desa, E.; Madhan, R.; Maurya P. (2006). Potential of autonomous underwater vehicles as new generation ocean data platforms. *Current Science* **90**(9), 1202–1209.
- Encarnação, P.M. (2002). Nonlinear Path Following Control Systems for Ocean Vehicles. Tesis doctoral. Universidad Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal.
- Feng, Z.; Allen, R. (2004). Reduced order $h\infty$ control of an autonomous underwater vehicle. *Control Engineering Practice* **12**(12), 1511–1520.
- Fjellstad, O. (1994). Control of Unmanned Underwater Vehicles in Six Degrees of Freedom. A Quaternion Feedback Approach. Tesis doctoral. Norwegian Institute of Technology. Trondheim, Noruega.
- Fossen, T.I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley & Sons.. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T.I. (2002). *Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics.
- Fossen, T.I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons.. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T.I.; Fjellstad, O.E. (1996). Robust adaptive control of underwater vehicles: A comparative study. *Modeling, Identification and Control* **17**(1), 47–61.
- Fossen, T.I.; Ross, A. (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. Chap. Nonlinear modelling, identification and control of UUVs, pp. 13–42. Vol. 69. Peter Peregrinus

- LTD. Gran Bretaña.
- Gorset, J.E. (2007). Nonlinear Model-Based Control of Slender Body AUVs. Tesis doctoral. Norwegian University of Science and Technology. Noruega.
- Guerra, C.E. (2010). Diseño e implementación de hardware y software de bajo nivel para vehículo submarino autónomo. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Healey, A.; Lienard, D. (1993). Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **18**(3), 327–339.
- Hegrenaes, O.; Hallingstad, O.; Jalving B. (2007). Comparison of mathematical models for the hugin 4500 auv based on experimental data. In: *The IEEE Internatinal Symposium on Underwater Technology*. IEEE Xplore. Japón.
- Hernández, L.; Valeriano, Y.; Cañizares J.R.; Balaguer L. (2011). Modelado y control del cidnav-auv. In: *XIV Convención y Feria Internacional Informática. X Simposio Internacional de Automatización*. MIC. La Habana.
- Ishaque, K.; Abdullah, S.S.; Ayob S.M.; Salam Z. (2010). Single input fuzzy logic controller for unmanned underwater vehicle. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* **59**(1), 87–100.
- Ishii, K.; Ura, T. (2000). An adaptive neural-net controller system for an underwater vehicle. *Control Engineering Practice* **8**, 177–184.
- Jakuba, M.V. (2003). Modeling and control of an autonomous underwater vehicle with combined foil/thruster. Tesis de maestría. Massachusetts Institute of Technology. Estados Unidos.
- Jalving, B. (1994). The ndre-auv flight control system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **19**(4), 497–501.
- Jalving, B.; Gade, K.; Svartveit K.; Willumsen A.; Sørhagen R. (2004). Dvl velocity aiding in the hugin 1000 integrated inertial navigation system. *Modeling, Identification and Control* **25**(4), 223–235.

- Kim, K.; Ura, T. (2002). 3-dimensional trajectory tracking control of an auv “r-one robot” considering current interaction. In: *The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Underwater Technology Research Center, Institute of Industrial Science, University of Tokyo. Kitakyushu, Japón.
- Kim, K.; Ura, T. (2003). Fuel-optimal guidance and tracking control of auv under current interaction. In: *The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*. The International Society of Offshore and Polar Engineers. Hawai, Estados Unidos.
- Kim, T.W.; Yuh, J. (2001). A, novel neuro-fuzzy controller for autonomous underwater vehicles. In: *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. IEEE Xplore. Seoul, Corea del Sur. pp. 2350–2355.
- Lemus, J.L. (2011). Software de navegación y guiado en tiempo real para Vehículo Autónomo Sumergible. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Liang, X.; Pang, Y.; Wan L.; Wang B. (2008). *Underwater Vehicles*. Chap. Dynamic Modelling and Motion Control for Underwater Vehicles with Fins, pp. 539–556. I-Tech. Viena, Austria.
- Liceaga, E. (1995). Submarine $h\infty$ depth control under wave disturbances under wave disturbances. *IEEE Transactions on Control System Technology* **3**(3), 338–346.
- Lienard, D.E. (1990). Autopilot design for autonomous underwater vehicles based on sliding mode control. Tesis de maestría. Naval Postgraduate School. Monterey, California.
- Martínez, A.; Rodríguez, Y.; Hernández L.; Guerra C.; Sahli H. (2010). Hardware and software architecture for auv based on low-cost sensors. In: *The 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV*. Nanyang Technological University of Singapore. IEEE Xplore. Singapur.
- Martínez, M.E. (2009). Desarrollo de sistemas de control para autopiloto de avión de pequeño porte. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.

- Ming, Q. (1997). Sliding mode controller design for abs system. Tesis de maestría. Virginia Polytechnic Institute. Virginia, Estados Unidos.
- Miskovic, N.; Vukic, Z.; Barisic M. (2008). *Underwater Vehicles*. Chap. Identification of Underwater Vehicles for the Purpose of Autopilot Tuning, pp. 327–346. I-Tech. Viena, Austria.
- Ni, L. (2001). Fault-tolerant Control of Unmanned Underwater Vehicles. Tesis doctoral. Virginia Polytechnic Institute. Virginia, Estados Unidos.
- Perez, T.; Fossen, T.I. (2008). Joint identification of infinite-frequency added mass and fluid-memory models of marine structures. *Modeling, Identification and Control* **29**(3), 93–102.
- Perez, T.; Fossen, T.I. (2009). A matlab toolbox for parametric identification of radiation-force models of ships and offshore structures. *Modelling, Identification and Control* **30**(1), 1–15.
- Pineda, L.M. (2008). Modelo matemático de un avión autónomo. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Puig, V.; Quevedo, J.; Escobet T.; Morcego B.; Ocampo C. (2004). Control tolerante a fallos (parte i). fundamentos y diagnóstico de fallos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **1**(1), 15–31.
- Rodríguez, Y.; Lemus, J. L. (2011). Sistema de software para la supervisión y control de vehículo autónomo subacuático. In: *XIV Convención y Feria Internacional Informática. X Simposio Internacional de Automatización*. MIC. La Habana, Cuba.
- Sangekar, M.; Chitre, M.; Beng T. (2008). Hardware architecture for a modular autonomous underwater vehicle starfish. In: *OCEANS*. IEEE Xplore. Quebec, Canadá. pp. 1–8.
- Slotine, J.J.; Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.. Nueva Jersey, Estados Unidos.
- Sosa, R. (2010). Sistema de Navegación Inercial Asistida por Modelo Dinámico para Vehículo Autónomo Sumergible. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.

- Sun, Y.; Cheah, C. (2003). Adaptive setpoint control for autonomous underwater vehicles. In: *Conference on Decision and Control*. The International Society of Offshore and Polar Engineers. Maui, Hawaii.
- Sun, Y.C.; Cheah, C.C. (2008). Adaptive control schemes for autonomous underwater vehicle. *Robotica* **27**(1), 119–129.
- Valeriano, Y.; Hernández, L.; Cañizares J.R.; Zamora H.L. (2011). Modelo dinámico de un vehículo autónomo sumergible de bajo costo. In: *CIE 2011*. FIE. Villa Clara, Cuba. pp. 1–4.
- Van der Molen, G.; Grimble, M. (1993). h_∞ submarine depth and pitch control. In: *32nd Conference on Decision and Control*. IEEE Xplore. Texas, Estados Unidos.
- Wang, L.R.; Liu, L.C.; Yu H.N.; Xu Y.R. (2002). Sliding mode control of an autonomous underwater vehicle. In: *Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Vol. 1. IEEE Xplore. Beijing, China. pp. 247 – 251.
- Welch, G.; Bishop, G. (2001). An introduction to the kalman filter. Reporte Técnico TR 95-041. University of North Carolina at Chapel Hill. Carolina, Estados Unidos.
- Wernli, R. L. (2000). Auv commercialization-who's leading the pack?. Technical report. SPAWAR Systems Center San Diego. California, Estados Unidos.
- Williams, S.J.; Marshfield, W.B. (1991). A switched h_∞ strategy for control of a submarine. In: *International Conference on Control '91*. Vol. 1. Edimburgo, Gran Bretaña. pp. 487–491.
- Yoerger, D.; Slotine, J.J. (1985). Robust trajectory control of underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **OE-10**(4), 462–470.
- Yoshida, H. (2008). *Underwater Vehicles*. Chap. Fundamentals of underwater vehicle hardware and their applications, pp. 557–582. I-Tech. Viena, Austria.
- Yuh, J.; Nie, J.; Lee C. (1999). Experimental study on adaptive control of underwater robots. In: *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. IEEE Xplore. Michigan, Estados Unidos.

Zamora, H.L. (2011). Control de trayectoria para el HRC-AUV considerando el efecto del oleaje y las corrientes marinas. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.

ANEXOS

ANEXOS A

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS, INERCIALES Y EXPERIMENTALES DEL HRC-AUV

La Tabla A-1 muestra los valores de todos los parámetros estimados en los experimentos realizados.

Tabla A-1: Resumen de los parámetros identificados y estimados para el HRC-AUV.

Parámetros	Descripción	<i>Valor</i>
$X_{\dot{u}}$	Masa Añadida	$-250,84 \text{ kg}$
$Y_{\dot{v}}$	Masa Añadida	$-3 \ 834 \text{ kg}$
$Z_{\dot{w}}$	Masa Añadida	$-3 \ 834 \text{ kg}$
$K_{\dot{p}}$	Masa Añadida	0
$M_{\dot{q}}$	Masa Añadida	$-15 \ 572 \text{ kgm}^2$
$N_{\dot{r}}$	Masa Añadida	$-15 \ 572 \text{ kgm}^2$
X_u	Término lineal de amortiguamiento	$-181,45 \frac{N}{m/s}$
Y_v	Término lineal de amortiguamiento	$-1219,8 \frac{N}{m/s}$
Z_w	Término lineal de amortiguamiento	$-1219,8 \frac{N}{m/s}$
K_p	Término lineal de amortiguamiento	$-126,62 \frac{Nm}{rad/s}$
M_q	Término lineal de amortiguamiento	$-9096,9 \frac{Nm}{rad/s}$
N_r	Término lineal de amortiguamiento	$-9096,9 \frac{Nm}{rad/s}$
$X_{u u }$	Término cuadrático de amortiguamiento	$-47,49 \frac{N}{m^2/s^2}$
b_1	Coficiente de ganancia del actuador	$0,1946 \frac{N}{(rad/s)^2}$
b_2	Coficiente de ganancia del actuador	$318,39 \frac{N}{rad}$
b_3	Coficiente de ganancia del actuador	$661,12 \frac{N}{rad}$
b_4	Coficiente de ganancia del actuador	$-2644,5 \frac{Nm}{rad}$
b_5	Coficiente de ganancia del actuador	$1273,56 \frac{Nm}{rad}$

La Tabla A-2 muestra los valores de los parámetros geométricos e inerciales del HRC-AUV.

Tabla A-2: Valores geométricos e inerciales del HRC-AUV.

Parámetros	Descripción	Valor
m	masa	4094,56 kg
u_0	velocidad crucero	1,9 m/seg
n	revoluciones de la hélice	52,36 rad/s
L	longitud	9,46 m
R	radio	0,4 m
I_{xx}	momento de inercia	450,1 kgm^2
I_{yy}	momento de inercia	21010,4 kgm^2
I_{zz}	momento de inercia	20816 kgm^2
I_{xz}	momento de inercia	275,44 kgm^2
BG	distancia entre CG y CB	$[0, 0, 22 \text{ mm}]^T$
δ_T	ángulo de deflexión timón horizontal	$\pm 30^\circ$
δ_E	ángulo de deflexión del estabilizador de cola	$\pm 30^\circ$

Es válido aclarar que los momentos de inercia del HRC-AUV se determinaron a partir de modelar el vehículo en el software “Mechanical Desktop”.