

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



## TRABAJO DE DIPLOMA

# Estrategia de guiado para el seguimiento de objetivos móviles por parte del vehículo subacuático *HRC – AUV*

Tesis presentada en opción al grado de  
Ingeniero en Automática

Autor: Danelis Costa Sánchez

Tutor: Msc. Yunier Valeriano Medina  
Ing. Alexei Fernández Tkachova

Santa Clara

2016

“Año 58 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 guiado para el seguimiento de objetivos móviles por parte del vehículo subacuático *HRC – AUV*

Tesis presentada en opción al grado de  
Ingeniero en Automática

Autor: Danelis Costa Sánchez  
email: dcosta@uclv.cu

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

Ing. Alexei Fernández Tkachova

email: takachora@uclv.cu

Santa Clara

2016

“Año 58 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 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.

---

Dianelis Costa Sánchez  
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.

---

Dianelis Costa Sánchez  
Autor

---

Fecha

---

Ivan Santana Ching, 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

*“No basta dar pasos que un día puedan conducir hasta la meta, sino que cada paso ha de ser una meta, sin dejar de ser un paso”.*

*Johann Peter Eckermann.*

## DEDICATORIA

A mi madre,  
*por su resistencia ante las situaciones de la vida, por comprenderme siempre y darme  
los mejores consejos.*

A mi padre  
*por estar siempre pendiente del desarrollo de mi carrera, por su paciencia y  
compromiso.*

A mi hermano  
*por legarme su ejemplo e inspirarme a seguir su camino.*

*A ellos, por ser los responsable de mi formación y educación, por confiar  
en mí, y ser mi apoyo incondicional.*

## AGRADECIMIENTOS

Especialmente a mis padres, que me han apoyado en todo momento y han sabido guiarme hasta convertirme en quien soy hoy.

A mi hermano, que me dejó sus pasos para que pudiera seguirlo.

A mi tutor Valeriano por su apoyo desde los inicios de mi carrera, por confiar en mí siempre, por impulsarme en los momentos más difíciles, por inspirarme con su seguridad. Y sobre todo por ser mi amigo.

A mi novio Carlos Daniel por su comprensión y apoyo, y a su familia por acompañarme en los últimos dos años, y convertirlos en alegría.

A Anailys, por no perder las esperanzas en las situaciones adversas de la investigación, por su tiempo y ayuda incondicional.

A mi tutor Tkachova, por su disposición y ayuda en la elaboración de la tesis.

A los amigos y compañeros de estudio, por compartir juntos estos últimos años, sobre todo a Leidys, Lianet, José Daniel, Dizahab, Luis, Ale y Claudia, porque en los últimos tiempos hemos compartido nuestras victorias y derrotas.

A Kire, por estar con mi familia durante el tiempo que no he podido estar presente, y suplir mi ausencia como una hija más.

A Niurys, por ser una amiga fiel e incondicional de mi familia y por darme sus consejos ante mis tropiezos.

A todos los profesores que durante la carrera han intervenido en mi formación profesional.

En general quisiera agradecer a todo aquel que de una forma u otra, ayudó a la realización de este trabajo de diploma y a mi formación.

Santa Clara, Cuba, 2016

## RESUMEN

Los estudios relacionados con los vehículos autónomos subacuáticos han alcanzado gran auge en el ámbito de las ciencias del mar. El desarrollo del sistema de guiado es trascendental para el cumplimiento de misiones sin intervención humana. En esta investigación se diseña, por primera vez, una estrategia de guiado que le permite al *HRC – AUV* seguir a un objetivo en movimiento. En el punto donde el vehículo alcanza al objetivo, esta estrategia permite que exista coincidencia entre la posición y velocidad de ambos. Los resultados obtenidos permiten ampliar el número de maniobras que puede realizar el vehículo. Para este estudio se utiliza el algoritmo de posición basado en la distancia *lookahead* y un algoritmo de velocidad. Los ajustes se realizan considerando el movimiento del objetivo y las características del vehículo. Los resultados del seguimiento se determinan mediante simulación, demostrando efectividad en el ajuste.

## TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO . . . . .	I
DEDICATORIA . . . . .	II
AGRADECIMIENTOS . . . . .	III
RESUMEN . . . . .	IV
INTRODUCCIÓN . . . . .	1
1. ESTUDIO SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE GUIADO UTILIZADAS EN VEHÍCULOS MARINOS PARA EL SEGUIMIENTO DE OBJETIVOS	6
1.1. Introducción . . . . .	6
1.2. Antecedentes, desarrollo y aplicaciones de los <i>AUV</i> . . . . .	6
1.3. Descripción general del HRC-AUV . . . . .	10
1.4. Guiado . . . . .	14
1.5. Leyes de guiado para el escenario <i>TT</i> . . . . .	18
1.6. Consideraciones finales. . . . .	20
2. SEGUIMIENTO DE OBJETIVOS MÓVILES . . . . .	22
2.1. Introducción . . . . .	22
2.2. Modelo matemático . . . . .	22
2.2.1. Sistema de coordenadas . . . . .	23
2.2.2. Ecuaciones dinámicas de un vehículo autónomo subacuático . . . . .	25
2.3. Modelos lineales . . . . .	25
2.3.1. Subsistema lateral . . . . .	26
2.3.2. Ecuación de velocidad de avance . . . . .	27
2.4. Controladores de rumbo y velocidad . . . . .	27
2.4.1. Controlador de rumbo . . . . .	28

2.4.2.	Controlador de velocidad . . . . .	28
2.5.	Algoritmos de guiado para el seguimiento de un objetivo móvil . . . . .	30
2.5.1.	Algoritmo de posición basado en la distancia <i>lookahead</i> . . . . .	30
2.5.2.	Algoritmo de velocidad . . . . .	32
2.6.	Consideraciones finales del capítulo . . . . .	34
3.	AJUSTE Y EVALUACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE GUIADO . . . . .	35
3.1.	Introducción . . . . .	35
3.2.	Valores de los parámetros que conforman las matrices y vectores del modelo no lineal de 6 <i>GDL</i> para el <i>HRC – AUV</i> . . . . .	36
3.3.	Controladores . . . . .	37
3.3.1.	Controlador de rumbo . . . . .	37
3.3.2.	Controlador de velocidad . . . . .	38
3.4.	Ajuste y evaluación de los algoritmos de posición y de velocidad . . . . .	39
3.5.	Análisis económico . . . . .	41
3.6.	Consideraciones finales del capítulo . . . . .	42
	CONCLUSIONES . . . . .	44
	RECOMENDACIONES . . . . .	45
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	49
A.	CÓDIGOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE GUIADO . . . . .	50

## INTRODUCCIÓN

Alrededor del 70 % del planeta está cubierto por agua. Existen diversos y múltiples campos de investigación relevantes relacionados con el mar: estudio de la diversidad marina y de ecosistemas, exploración, explotación y conservación del océano y sus recursos, aplicaciones en defensa y seguridad, protección de costas, de infraestructuras marítimas y construcción naval y desarrollos en la industria marítima auxiliar (Cruz, 2012). Cada uno de estos campos plantea multitud de retos, pero todos ellos tienen en común la necesidad de lograr soluciones integrales para lo cual la automática juega un papel importante, en especial en el desarrollo de vehículos marinos autónomos.

Los entornos marinos imponen un gran número de restricciones en la construcción y operación de estos vehículos, como son: las limitaciones en las comunicaciones, las características especiales de sensores y actuadores, la presencia de olas y corrientes, las condiciones atmosféricas, los efectos hidrodinámicos sobre los vehículos y las presiones a las que se ven sometidos cuando operan bajo el agua (Cruz, 2012). No obstante, los desarrollos en la tecnología de las comunicaciones y de las computadoras, de los sensores y de los sistemas de almacenamiento de energía están propiciando el desarrollo creciente de sistemas de control aplicados a vehículos marinos.

El término de vehículos subacuáticos engloba distintos tipos de vehículos (Blidberg, 2001). Un primer grupo reúne a aquellos que se trasladan remolcados a la parte trasera de un barco. Otra variante son los nombrados *Remotly Operated Vehicle (ROV)*, que caracterizan a los vehículos operados por vía remota y son enlazados a los barcos por medio de un cable de comunicación. Por otro lado están los *Unmanned Underwater Vehicle (UUV)*, los cuales requieren cierto nivel de comunicación por medio de una señal transmitida al vehículo para cumplir una misión determinada. Un cuarto grupo los constituyen los *Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*. Los AUV, son vehículos controlados por un ordenador que operan debajo del agua. Son considerados autónomos porque no tienen conexión física con el operador que puede estar a bordo de un barco acompañante o en tierra. Son vehículos auto-guiados y auto-propulsados que no necesitan intercambiar información durante las misiones para cumplir sus tareas (Fjellstad, 1994; Blidberg, 2001; Antonelli, 2008; Alvarez, 2009; Valdés, 2010).

Los vehículos submarinos no tripulados han sido un campo activo de investigación durante más de cinco décadas. Los *AUV* representan el 84 % de los vehículos submarinos en utilización, esta tendencia, está dada porque las investigaciones han estado centradas en aprovechar la versatilidad y potencialidades que caracterizan a este tipo de vehículos (Valdés, 2010). Los *AUV* pueden proveer de información a varios sectores como son las industrias petrolera y de las telecomunicaciones. Esta tecnología está generalmente diseñada para un propósito en particular, sin embargo, al iniciarse las investigaciones relacionadas con los *AUV*, estuvieron restringidos a un grupo de tareas y limitados al ámbito científico y militar. Con el paso del tiempo las aplicaciones de estos vehículos se han diversificado considerablemente, centradas principalmente en el desarrollo de las capacidades de autonomía, navegación, sensores y de los sistemas de comunicación (Valdés, 2010).

En el área de la investigación submarina, se ha visto el potencial de los *AUV* y ya es claramente reconocido por la mayoría de los investigadores. Existe un gran número de vehículos que han sido diseñados con distintas finalidades, que han hecho un impacto positivo en la comunidad científica, tales son los casos de los *AUV GARBI*, *Alister A-18 M* y el *Seawolf*. La Universidad de Oporto en Portugal (Ramos, 2008), la Universidad de Girona en España (Amat, 1999), la Universidad de *Newcastle* en Australia (Fossen, 2008), la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (Fossen, 1994, 2002, 2006, 2008; Lekkas, 2014), entre otras, han desarrollado e investigado esta tecnología a nivel mundial.

En Cuba, el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (*GARP*) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas y el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (*CIDNAV*), se convirtieron en pioneros de esta tecnología al crear un prototipo, primero de su tipo en el país, dado a conocer como *HRC – AUV*. El proyecto está desarrollado, en un principio, con finalidades científicas, para su posterior utilización en la exploración del ambiente marino, así como en el reconocimiento de las costas cubanas. Este proyecto tiene diferentes líneas de trabajo, entre las cuales destacan el desarrollo de los sistemas de navegación, control y guiado (Martínez, 2010; Valeriano-Medina, 2013b,a; Martínez, 2013; Garcia-Garcia, 2012; Valeriano-Medina, 2015).

Para el *HRC – AUV* se han desarrollado distintas variantes relacionadas con el sistema de guiado del vehículo. Estas propuestas resultan factibles debido a la existencia de un modelo matemático del vehículo (Valeriano-Medina, 2013b,a), además del equipamiento sensorial y demás hardware necesarios a bordo para el desarrollo de un sistema de navegación (Martínez, 2013). Además se cuenta con los controladores de profundidad

y rumbo para el sistema de control (Valeriano-Medina, 2013b,a). En un principio, relacionado con el sistema de guiado, se obtuvieron resultados con el fin de seguir puntos (Valeriano-Medina, 2013b), luego se implementaron leyes que permiten al vehículo el seguimiento de caminos en líneas rectas (Lemus, 2011). Estas leyes se han modificado con el propósito de reducir el efecto de las perturbaciones marinas durante el seguimiento de un camino recto, para lo cual se ha incluido un controlador  $I-LOS$  (Valeriano-Medina, 2015). También Fernández implementa el controlador  $I-LOS$ , pero en su caso, evalúa su desempeño en el seguimiento de caminos curvos (Fernández, 2015).

Todas estas variantes tienen que ver con el escenario de seguimiento de caminos, o sea, los objetivos de control que hasta el momento han sido planteados responden al cumplimiento de tareas sin restricciones temporales. Pero es de interés para el *GARP* el desarrollo de una estrategia de guiado, que le permita al vehículo el cumplimiento de tareas con restricciones espaciales y temporales. De esta manera se le daría solución a los objetivos de control relacionados con el escenario de seguimiento de objetivos móviles, con lo cual se ampliarían los tipos de maniobras que el vehículo podría realizar.

En consecuencia se plantea el siguiente **problema científico**: No se dispone de una estrategia de guiado que le permita al vehículo subacuático *HRC – AUV* el seguimiento de un objetivo que se encuentra en movimiento.

La hipótesis de esta investigación se sustenta en los resultados de la revisión bibliográfica presentada en el Capítulo 1.

### **Hipótesis:**

Una estrategia de guiado que asegure coincidencia en velocidad y posición entre el vehículo y su objetivo a seguir, garantizaría el seguimiento de objetivos móviles por parte del *HRC – AUV*.

Con esta investigación se pretende cumplir los siguientes objetivos:

**Objetivo general:** Diseñar una estrategia de guiado que le permita al vehículo subacuático *HRC – AUV* seguir un objetivo en movimiento.

### **Objetivos específicos:**

1. Estudiar los aspectos teóricos relacionados con el guiado de vehículos marinos que aparecen reportados en la literatura.
2. Estudiar la dinámica del *HRC – AUV*, así como los controladores implementados en el vehículo.
3. Ajustar el controlador de velocidad para el vehículo.
4. Ajustar los parámetros de los algoritmos que componen la estrategia de guiado para el seguimiento de objetivos móviles.

5. Evaluar mediante simulación los resultados obtenidos con la estrategia de guiado durante el seguimiento de objetivos móviles.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos anteriormente expuestos se propone ejecutar las siguientes tareas:

- Revisión en la literatura especializada de los aspectos teóricos relacionados con el guiado.
- Estudio de las estrategias de guiado que se utilizan para el seguimiento de objetivos en movimiento en vehículos marinos.
- Estudio de la dinámica del vehículo *HRC – AUV* y del controlador de rumbo implementado en el mismo.
- Definición de la estrategia de guiado a diseñar para el seguimiento de objetivos móviles por parte del *HRC – AUV*.
- Ajuste del controlador de velocidad para el *HRC – AUV*.
- Evaluación mediante simulación del desempeño del controlador de velocidad.
- Selección de los parámetros necesarios para realizar el ajuste de los algoritmos de posición y velocidad de la estrategia de guiado.
- Evaluación mediante simulación del desempeño de la estrategia de guiado.
- Elaboración del informe científico de la investigación.

El principal aporte de este trabajo radica en que se propone y diseña una estrategia de guiado para el seguimiento de objetivos en movimiento para el vehículo autónomo subacuático *HRC – AUV*. De esta manera se avanza en el diseño e implementación de un sistema de guiado para el vehículo, lo cual permitirá la realización de distintos tipos de maniobras.

### **Contenido de la Tesis:**

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 presenta el análisis crítico de la literatura consultada, que sustenta la selección de la estrategia de guiado que se evalúa en el *HRC – AUV*. Se presentan los principales conceptos que se abordan en este trabajo, introduciendo las estrategias de guiado para el seguimiento de objetivos móviles empleadas en los *AUV*. Además se realiza una descripción del vehículo *HRC – AUV* que constituye el objeto de estudio de esta investigación.

Capítulo II: En este capítulo se abordan los conceptos, definiciones y aspectos de interés esenciales referidos a la estrategia de guiado que se evalúa en el *HRC – AUV*, así como la

metodología a seguir para su diseño. Se presentan los modelos dinámicos y controladores del vehículo que han sido obtenidos en trabajos anteriores y que sirven de base para esta investigación. Se presenta la estructura del controlador de velocidad que por primera vez se ajusta en el vehículo.

Capítulo III: En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la investigación. Se detallan los pasos seguidos para el ajuste de cada uno de los elementos de la estrategia de guiado y se presentan los resultados obtenidos mediante simulación. Por último se presenta el análisis económico.

# CAPÍTULO 1

## ESTUDIO SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE GUIADO UTILIZADAS EN VEHÍCULOS MARINOS PARA EL SEGUIMIENTO DE OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

En este capítulo se realiza un análisis de la bibliografía consultada, correspondiente a la temática de vehículos autónomos subacuáticos. El análisis tiene como centro de atención al sistema de guiado, el cual resulta esencial en la realización de misiones autónomas. Es por eso que en gran parte del capítulo se hace mención a varias de las estrategias de guiado que se reportan en la literatura especializada, fundamentalmente las relacionadas con el seguimiento de objetivos en movimiento. Los trabajos anteriores realizados por *GARP* sobre el vehículos *HRC – AUV* también son analizados y sirven como punto de partida para esta investigación, lo cual se complementa con la descripción del vehículo y del equipamiento electrónico y sensorial que tiene instalado.

### 1.2. Antecedentes, desarrollo y aplicaciones de los *AUV*

Los vehículos autónomos submarinos son sistemas que operan bajo el agua, contienen su propia fuente de energía y poseen una arquitectura de control que les permite realizar misiones sin la supervisión de un operador ([Blidberg, 2001](#); [Fernandes, 2003](#); [Antonelli, 2008](#); [Breivik, 2010](#)). Por lo general no hay una línea de comunicación entre el vehículo y la superficie, ya que se le suele programar con tareas y misiones predefinidas.

Actualmente, en pleno siglo XXI, más del 70 % de la superficie del planeta está bajo el agua, pero el fondo del océano es todavía un territorio desconocido en su mayor parte. Se poseen detallados mapas terrestres, incluso de lugares remotos como lo son otros planetas, pero no existe un mapa detallado del fondo del océano ([Guillén, 2011](#)). Las particularidades de los *AUV* propician la idea de revolucionar el acceso a los océanos, conocerlos y poder estudiarlos.

El desarrollo de los *AUV* se inició en la década de 1960. Algunos vehículos se construyeron principalmente para aplicaciones muy específicas de recopilación de datos. No obstante, son escasas las publicaciones acerca de estos primeros prototipos (Robles, 2014). Durante la década de 1970 aparecieron los primeros avances en el desarrollo tecnológico de estos vehículos. La Universidad de *Washington* desarrolló los vehículos *SPURV* (*Self Propelled Underwater Vehicle*), los cuales se utilizaron para recopilar datos de las regiones árticas. También el Laboratorio de Ingeniería de Sistemas (actualmente Instituto de Sistemas Subacuáticos) de la Universidad de la Marina de *New Hampshire* desarrolló el vehículo *EAVE*, junto con un esfuerzo complementario llevado a cabo en las instalaciones de la Marina de los Estados Unidos, en San Diego.

Por otra parte, el Instituto de Tecnología Marina (*IMTP*) y la Academia Rusa de Ciencias (*RAS*), comenzaron su programa de *AUV* con el desarrollo de los vehículos *SKAT*, así como de los primeros *AUV* sumergibles L1 y L2 (Robles, 2014). En esa década la cantidad de *AUV* no era considerable. Sin embargo, este período se puede definir como un momento significativo en la experimentación con estos sumergibles.

A partir de los años 80, se produjeron una serie de avances tecnológicos fuera del campo de los *AUV* que beneficiaron a sus desarrolladores (Blidberg, 2001). Ordenadores con memorias pequeñas y energéticamente eficientes, nuevas tecnologías electrónicas compactas, el desarrollo de motores pequeños de alta eficiencia y la aparición de baterías recargables de mayor duración, ofrecieron el potencial necesario para implementar sistemas complejos de navegación y algoritmos de control en vehículos autónomos (Alvarez, 2009).

Los avances en ingeniería de software permitieron desarrollar nuevos sistemas. Este período evidentemente constituyó un momento crucial para la tecnología de los *AUV*. Se tuvieron ideas claras acerca de la evolución de las tecnologías en los sistemas operativos, pero faltaba precisión en las tareas que deberían completar estos sistemas (Blidberg, 2001).

La década desde 1990 hasta el 2000 se caracterizó por un desarrollo de los *AUV* a escala internacional, se definieron las misiones que debían completar y surgieron nuevos paradigmas para el empleo de estos vehículos. Hubo un gran avance en cuanto a recursos necesarios para acercar esta tecnología a la comercialización (Blidberg, 2001; Fernandes, 2003). Durante esta década, un número significativo de instituciones de todo el mundo se comprometieron en el desarrollo de proyectos basados en vehículos multitareas.

A partir del año 2000 ya se puede clasificar al *AUV* como un producto industrial para obtener diversos beneficios económicos (Wernli, 2000). Por tal motivo se establecen los mercados comerciales donde se emplearían estos vehículos. En este período la tecnología

de los *AUV* da un salto desde el campo académico y el ambiente de la investigación hacia el comercio (Blidberg, 2001). En el año 2001 se hizo pública una lista que contenía un total de 75 *AUV* operativos alrededor del mundo (Fernandes, 2003), mientras en el 2008 la cifra ya era de cerca de 200 (Antonelli, 2008).

Dos aplicaciones han motivado en el pasado el desarrollo de estos vehículos submarinos: los tendidos de cable para comunicaciones y las plataformas oceánicas para la extracción de petróleo y gas. No obstante, en la actualidad hay otras aplicaciones que se benefician de las capacidades de los *AUV*, entre ellas se pudieran citar: la investigación oceánica, tanto biológica como geológica; las aplicaciones de tipo militar, centradas principalmente en la vigilancia, localización y neutralización o en su caso recuperación de minas o armamento hundido; localización y rescate de barcos y aviones sumergidos y la inspección y reparación de buques o de construcciones con estructura bajo agua (Alvarez, 2009).

Actualmente varios proyectos se han desarrollado internacionalmente con fines comerciales, o de carácter académico, donde se utilizan los *AUV* en algunas de las aplicaciones mencionadas. En la Figura 1–1 se representan varios ejemplos de *AUV* que a continuación se describen:

***AUV GARBI***: Es un vehículo creado por la *UdG* (*Universitat de Girona*), perteneciente al proyecto *AIRBUS*<sup>1</sup> desarrollado en España.

Este vehículo se utiliza en la inspección de presas, para determinar posibles obstrucciones, acumulación de lodo, arcilla o bien algún tipo de especie vegetal que deje inutilizada alguna reja de filtrado, entre otras muchas finalidades. El vehículo ha sido concebido para la exploración en aguas poco profundas, hasta 200 m. El *AUV* tiene dimensiones de 35 cm de diámetro y pesa 35 kg. Su comunicación se basa en radio-modems. Las características del hardware instalado en el vehículo son: PC-104 modelo 486+ con velocidad de procesamiento de 300 MHz, 32MB de memoria Ram y 1GB de memoria *Flash*. Dispone de sensores de presión, 2 Videos cámaras y *GPS* (Amat, 1999).

El *AUV GARBI* implementa dos tipos de procedimientos para la navegación: el comportamiento *Go-to-Go*, el cual es un autopiloto para operaciones en dos coordenadas, que conduce el vehículo a un objetivo específico, minimizando el error de rumbo. La segunda forma de actuación está dirigida a evitar obstáculos, para lo cual utiliza la

---

<sup>1</sup>El proyecto *AIRBUS* (Aplicaciones Industriales de Robots *SUB*marinos) es desarrollado en conjunto por las universidades *UPC* (*Universitat Politècnica de Catalunya*) y *UIB* (*Universitat de les Illes Balears*)

distancia al objetivo y el ángulo con el que debe interceptar para producir una fuerza de repulsión.

La prioridad para evitar obstáculos está por encima del comportamiento *Go-to-Go*, por tanto esta regla es con la que opera el vehículo cuando está cerca de un obstáculo (Amat, 1999).

***AUV Alister A-18 M***: Es un producto que ha sido desarrollado por la empresa *ECA Group* para aplicaciones militares. El *A-18 M* es un vehículo con el cual se pueden desarrollar misiones a profundidades inferiores a 300 m en aguas con diferente salinidad y temperatura y las misiones pueden durar 21 horas.

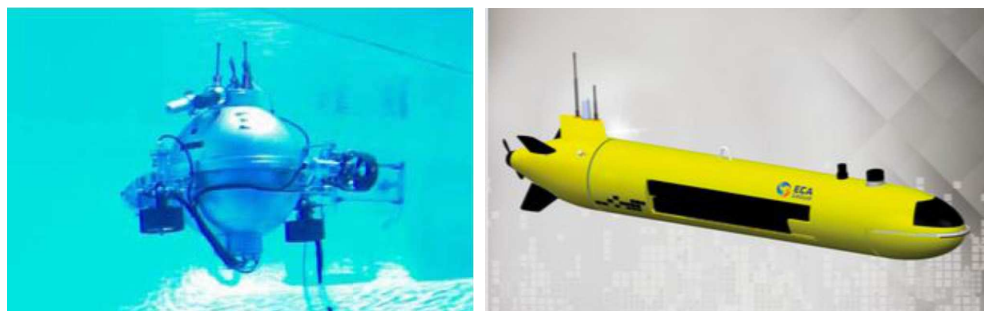
Su modo de operación varía en función de la plataforma en la que se despliega, realizando una misión distinta para cada una de ellas. Si se utiliza como plataforma un barco de reconocimiento, el *AUV* tiene como objetivo la exploración marina. Pero si es desplegado desde un buque científico, en este caso, realiza misiones oceanográficas e hidrográficas. Si opera a partir de corbetas y fragatas, el vehículo realiza misiones de prevención y rastreo de minas (Group, 2016).

El *Alister* dispone de un sistema de gestión de misiones que es fácil de utilizar. Equipado con doble pantalla, lo que permite definir las tareas y simultáneamente observar y controlar el estado actual de los sensores instalados en el *AUV*. Este vehículo cuenta con dos propulsores longitudinales, y timones horizontales y verticales en popa y horizontales en proa. Se trata de un *AUV* de una longitud de 5 m, con un radio de 0,7 m y una masa de 980 kg. Este vehículo alcanza una velocidad máxima de 8 nudos y una velocidad crucero de 4 nudos.

***AUV SeaWolf***: Es un vehículo producido por ATLAS MARIDAN (Hornfeld, 2016), dirigido principalmente hacia la inspección de las instalaciones submarinas, la seguridad marítima y la realización de estudios científicos. Tiene dimensiones de 2 m de largo, 0.50 m de diámetro, con una masa de 112 kg. Puede completar misiones hasta 300 m de profundidad, tiene gran capacidad de carga útil y una autonomía de varias horas con una velocidad de hasta 8 nudos. Es capaz de flotar y tiene una muy buena capacidad de maniobra debido a sus 5 propulsores.

El *AUV SeaWolf* también puede estar equipado con un cable de fibra óptica, de largas longitudes, para lograr una banda ancha de transmisión de datos. El vehículo, con su combinación de potencia y maniobrabilidad, es capaz de ejecutar una variedad amplia de tareas de inspección, vigilancia y reconocimiento, incluso en entornos de alta corriente y cubriendo estructuras extremadamente complejas. Además, es capaz de detectar y clasificar anomalías sin apoyo humano. Tales anomalías pueden ser manejadas incluso en

áreas de gran biodiversidad marina y en regiones de poca visibilidad. Para hacer frente a estos retos de rendimiento más exigentes, el *AUV* está equipado con: un paquete de sensores múltiples, un software de procesamiento de imágenes, un sistema de navegación preciso de largo alcance geográfico y un sistema de navegación preciso de corto alcance con respecto al objetivo.

(a) *AUV Garbi*(b) *AUV Alister*(c) *AUV SeaWolf*Figura 1–1: Proyectos de *AUV*.

### 1.3. Descripción general del HRC-AUV

El proyecto *HRC – AUV* es el primero que desarrolla la tecnología de los *AUV* en Cuba. Para esta finalidad, colaboran el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (*GARP*) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas y el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (*CIDNAV*).

En el caso del *HRC-AUV*, los objetivos a alcanzar se relacionan a continuación ([Martínez, 2013](#)):

- Diseño de un vehículo capaz de realizar amplios desplazamientos para complementar labores de supervisión y exploración en la plataforma marina.
- Método de navegación con la menor dependencia posible de factores externos.
- El *AUV* debe ser capaz de operar en varios modos de trabajo.
- Las estrategias de control del vehículo deben estar basadas en diseños clásicos de alta fiabilidad.

- La arquitectura de hardware debe ser sencilla, de bajo costo y basada en dispositivos de fácil adquisición y mantenimiento.
- El software a los distintos niveles de la arquitectura de hardware debe ponderar la funcionalidad, con un carácter modular que permita su rápido despliegue y puesta a punto.

El diseño mecánico y la construcción naval del *HRC – AUV* corre a cargo del *CIDNAV*. Como resultado de su labor, se cuenta con un vehículo con alto grado de simetría y con forma cilíndrica, cuya estructura es similar al *Hugin* 4500 (Hegrenaes, 2007) y al *STAR-FISH* (Sangekar, 2008). El sistema de actuadores está compuesto por un propulsor y dos timones de control, uno para el rumbo y otro para la profundidad, ubicados en la parte trasera del vehículo y accionados eléctricamente (Martínez, 2010). Esta configuración hace que un mismo actuador se emplee para controlar varios movimientos, lo cual convierte a este vehículo en sub-actuado. El *HRC-AUV* puede operar de forma segura hasta profundidades de 10 m, con tres modos de operación fundamentales: teledirección para las misiones en superficie, autopiloto con los lazos de control activados para seguir los valores deseados de rumbo y profundidad, y un tercer modo para el seguimiento de trayectorias. Los datos geométricos, físicos e inerciales del vehículo aparecen en la Tabla 1–1.

Tabla 1–1: Datos geométricos, físicos e inerciales del *HRC – AUV*

Parámetros	Descripción	Valor
$m$	masa	4094.56 $kg$
$u_0$	velocidad crucero	1.9 $m/s$
$n$	revoluciones del propulsor	52.36 $rad/s$
$L$	largo	9.46 $m$
$R$	radio	0.4 $m$
$I_{xx}$	momento de inercia	450.1 $kgm^2$
$I_{yy}$	momento de inercia	21 010.4 $kgm^2$
$I_{zz}$	momento de inercia	20 816 $kgm^2$
$I_{xz}$	momento de inercia	275.44 $kgm^2$
<b>BG</b>	distancia entre el <i>CG</i> y el <i>CF</i>	$[0, 0, 22 \text{ mm}]^T$
$\delta_T$	ángulo de deflexión del timón horizontal	$\pm 30^\circ$
$\delta_E$	ángulo de deflexión del timón vertical	$\pm 30^\circ$

En la Figura 1–2 se presenta el esquema donde aparece el hardware y los elementos del sistema sensorial instalados en el *HRC – AUV*. Esta estructura tiene dos segmentos claramente definidos: la estación ubicada a bordo del submarino y la estación remota, esta última puede ubicarse en tierra firme o en una embarcación acompañante.

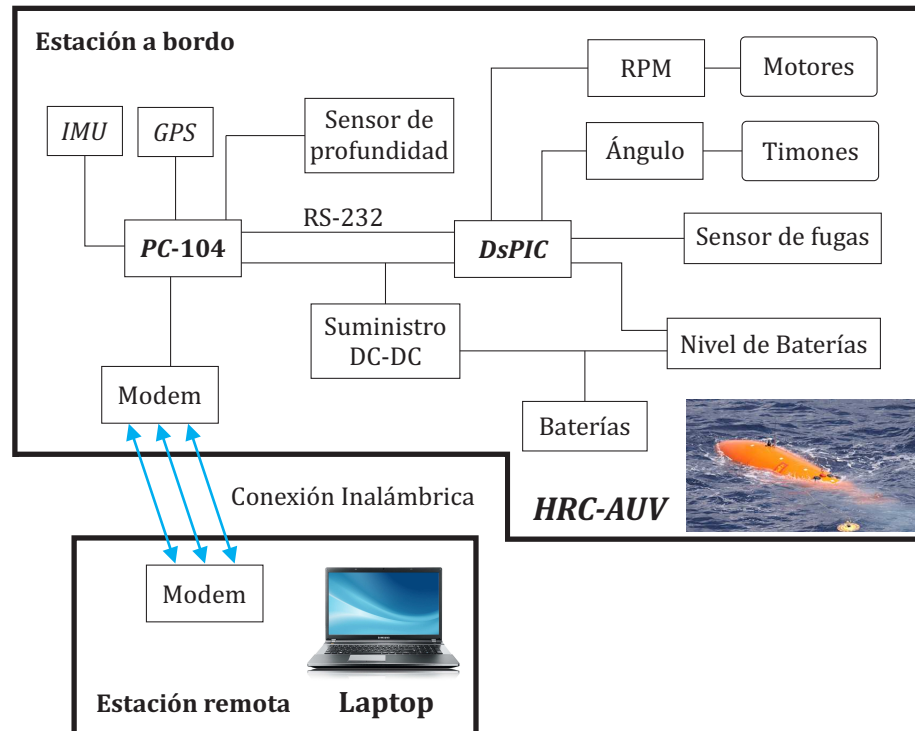


Figura 1–2: Arquitectura de hardware y sensorial instalada en el *HRC – AUV* .

El segmento a bordo está compuesto por dos unidades de cómputo y una unidad de potencia. Las unidades de cómputo son una PC industrial (PC-104) y un sistema empujado con un *DsPIC* 30F4013 que comparten las tareas de adquisición de los datos de los sensores, el control del vehículo y la navegación.

Los sensores instalados en el *HRC – AUV* son de bajo costo y pueden ser agrupados en las siguientes categorías (Martínez, 2010):

- Unidad de Medición Inercial (*IMU*): *MTi* de la firma *Xsens*<sup>®</sup>. Esta unidad contiene arreglos 3D de acelerómetros, giróscopos y magnetómetros. Se utiliza para determinar con precisión la orientación del vehículo en tiempo real.
- *GPS*: *XL12* de la firma *Garmin*<sup>®</sup>, sensor digital. Brinda información precisa de la posición del vehículo dada en latitud, longitud y altura. Se emplea solamente durante la navegación en superficie.
- Sensor de profundidad: *Cerabar T PMP 131* de la firma *Endress + Hauser*<sup>®</sup>, sensor analógico. Es usado para determinar la profundidad a la que opera el *AUV*.

Para las misiones donde interviene el sistema de guiado el sensor principal lo constituye el *GPS*, ya que es el encargado de suministrar las mediciones de la posición del vehículo. No existe un sensor a partir del cual se puedan obtener mediciones directas de la velocidad. Tanto el *GPS* como la *IMU* ofrecen estimaciones de velocidad que no son del todo exactas. El sistema sensorial del *HRC – AUV* tiene como una de sus características

que es abierto, o sea, otros sensores pueden ser agregados sin tener que modificar la estructura existente. En tal sentido, resulta necesario la incorporación de un sensor tipo sonar o *DVL* (*Doppler Velocity Log*) con el cual se pueda medir la velocidad del vehículo e incluso se pueda estimar la de otra embarcación que sea de interés seguir.

El segmento remoto (en tierra o barco) es para la supervisión y configuración de las maniobras del vehículo y está compuesto por una *laptop* que ejecuta el software de alto nivel, brindando al operador una interfaz de monitoreo, control y tele-operación del vehículo (Rodríguez, 2011). La *laptop* utiliza un dispositivo de comunicación inalámbrico y antenas apropiadas para el intercambio de datos durante las misiones siempre y cuando el vehículo se encuentre navegando en superficie.

Hasta el momento, el *GARP* ha realizado un grupo de investigaciones referentes al modelado y control de vehículos marinos, sistemas de navegación y guiado, así como equipamiento sensorial, instalación del hardware y programación del software de bajo y alto nivel del *HRC – AUV*, que responden a los principales objetivos del vehículo. Valeriano (Valeriano-Medina, 2013a), en su investigación determina un modelo no lineal de 6 *GDL* para el *HRC – AUV* que representa adecuadamente el comportamiento dinámico del vehículo, así como el efecto que sobre el mismo provocan las olas y las corrientes marinas. La validez del modelo ha quedado demostrada mediante simulación y pruebas experimentales realizadas en el mar con el *AUV*. Los modelos dinámicos lineales, derivados del modelo no lineal, han sido empleados en el diseño de los controladores de rumbo y profundidad que presenta el vehículo. Para el sistema de control se han diseñado controladores *PID*. El desempeño de estos controladores ha podido ser evaluado en pruebas experimentales (Valeriano-Medina, 2013b). Otros tipos de controladores han sido diseñados para el *HRC – AUV* en investigaciones más recientes (Valeriano-Medina, 2016; López, 2013; Martínez, 2012; Juvier, 2013), con el propósito de obtener la mejor versión posible para el autopiloto del vehículo. Todas estas propuestas se han evaluado mediante simulación.

Por otro lado, en el sistema de navegación se han evaluado algoritmos basados en la utilización de filtros paso bajo en cascada con dos etapas, hasta observadores de estado (García, 2014). Como resultado, se dispone de dos variantes de filtrado para las olas tanto para el lazo de control de dirección como de profundidad. Por su parte, Martínez propone una estrategia de navegación inercial asistida por modelo (*MA – INS*) (Martínez, 2015).

Relacionado con el sistema de guiado se han obtenidos resultados, todos ellos asociados al seguimiento de caminos predefinidos (Lemus, 2011; Valeriano-Medina, 2013b; Hernández, 2014; Fernández, 2015).

## 1.4. Guiado

El sistema de control de movimiento para los vehículos marinos, como se aprecia en la Figura 1–3, consta de tres subsistemas: sistema de control, sistema de navegación y el sistema de guiado. Este último sistema puede tener algoritmos o leyes de dirección y velocidad, a partir de los cuales se logra el cumplimiento de misiones de manera autónoma (Hernández, 2014).

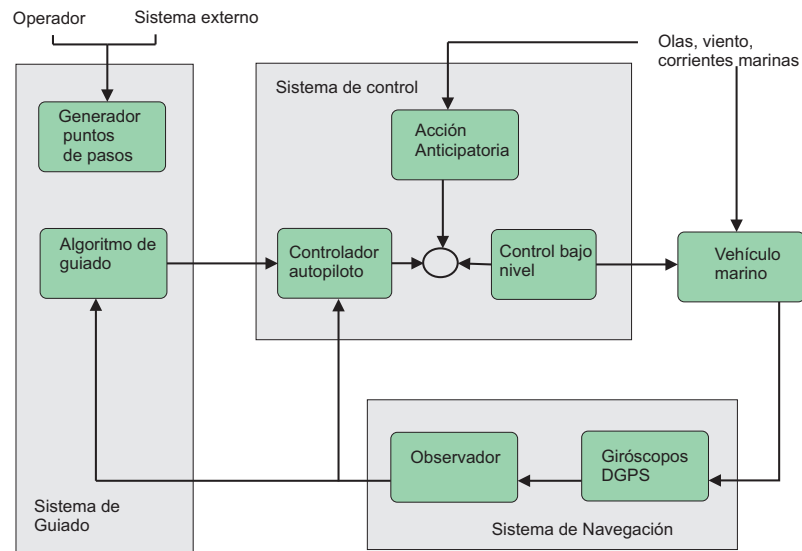


Figura 1–3: Esquema general del sistema de control de movimiento para un vehículo marino.

El guiado de vehículos marinos se define como la acción o el sistema que continuamente calcula la posición, velocidad y aceleración deseada de la embarcación, las cuales son utilizadas en el sistema de navegación. Los datos provienen usualmente de un operador humano y del sistema de navegación. Los componentes básicos que presentan los sistemas de guiado son: los sensores de movimiento, los datos referentes al medio externo donde se desarrolla la misión (velocidad y dirección del viento, altura de las olas, velocidad y dirección de las corrientes) y una computadora. La computadora es la encargada de captar y procesar los datos para luego realimentar los resultados hacia el sistema de control de movimiento. En muchos casos se utilizan técnicas avanzadas de optimización para obtener la trayectoria que debe ser seguida por el vehículo, en ello se pueden considerar diferentes aspectos tales como el ahorro de combustible, la evasión de colisiones, la sincronización, entre otros (Lekkas, 2014).

El guiado representa una metodología que trasciende más allá de las aplicaciones de un vehículo específico y que tiene que ver con el comportamiento del movimiento transitorio, asociado al cumplimiento de los objetivos del control de movimiento. Por esta razón, las leyes de guiado se expresan propiamente hacia un nivel cinemático,

teniendo en cuenta solo los aspectos geométricos que son de interés para un escenario específico de control de movimiento (Shneydor, 1998; Breivik, 2010).

Para comprender las definiciones de los diferentes escenarios de control de movimiento de los vehículos marinos, es necesario conocer los diferentes espacios de operación (Breivik, 2010):

**Espacio de trabajo** (*Work Space*): Representa el espacio físico en el cual se mueve el vehículo, también es conocido como espacio operacional en el campo de la robótica. El espacio de trabajo es común para todos los vehículos de la misma categoría.

**Espacio de configuración** (*Configuration Space*): Está constituido por una determinada cantidad de variables que se utilizan para especificar todos los puntos en el espacio de trabajo de un vehículo que se pueda considerar como un cuerpo rígido (Breivik, 2010; La Valle, 2006). También es conocido como espacio de la articulación en la literatura robótica. Cada variable de configuración se llama grado de libertad (*GDL*).

Para el guiado, resulta necesario tener en consideración algunas clasificaciones que existen de acuerdo a las características de actuación de un vehículo, que implican el tipo, cantidad y distribución de dispositivos que provocan el movimiento, tales como hélices, propulsores y timones. En este sentido, es común clasificar a los vehículos de acuerdo a dos propiedades de actuación diferentes (Breivik, 2008, 2010):

**Sobre-actuado**: Es aquel vehículo en el cual se puede controlar de manera independiente y simultánea los movimientos en todos sus grados de libertad.

**Sub-actuado**: Es aquel vehículo donde no es posible controlar de manera independiente y simultánea los movimientos en todos sus grados de libertad.

Basándose en estas definiciones, se determina que un vehículo sub-actuado es incapaz de realizar tareas específicas en su espacio de configuración. No obstante, puede lograr el cumplimiento de estas tareas en su espacio de trabajo (Breivik, 2008, 2010).

La literatura refiere la existencia de 4 escenarios de control que son los que tradicionalmente se han estudiado:

**Punto de Estabilización** (*Point stabilization*): implica el movimiento hacia un punto que se encuentra fijo.

**Seguimiento de trayectoria** (*Trajectory Tracking*): comprende el movimiento a lo largo de una trayectoria parametrizada en el tiempo.

**Seguimiento de camino** (*Path Following*): movimiento a lo largo de un camino no dependiente del tiempo.

**Maniobrabilidad** (*Maneuvering*): mezcla las características del seguimiento de trayectoria y del seguimiento de camino, donde la parametrización del camino se puede variar de acuerdo a la dinámica del vehículo.

En el caso de vehículos marinos, estos escenarios de control se definen mediante objetivos de control que están relacionados con tareas a cumplimentar en el espacio de configuración. Por ejemplo, en el plano horizontal, dicha tarea sería conseguir controlar la posición del vehículo y el rumbo de manera simultánea. Por tal motivo, estos escenarios son más adecuados para los vehículos sobre-actuados, ya que los sub-actuados no podrían implementar estas tareas cuando estén expuestos a las perturbaciones marinas. Otro elemento a considerar, consiste en que los escenarios de control tradicionales solo tienen en cuenta el movimiento que se desea siga el vehículo, el cual es definido de manera previa. No considera aquellos casos en los cuales no se dispone de información sobre los movimientos que se producirán en el futuro, por ejemplo, cuando se quiere seguir la posición de un punto real o virtual (Breivik, 2010).

Estos aspectos han provocado que en investigaciones recientes hayan sido redefinidos los escenarios de control (Breivik, 2010; Lekkas, 2014). De esta manera se han incluido escenarios de control que cuentan con toda la información de la maniobra y otros que no. En todos los casos el objetivo de control constituye una tarea en el espacio de trabajo. A continuación se presenta esta nueva clasificación, la cual es adoptada por esta investigación.

**Seguimiento de un objetivo en movimiento** (*Target Tracking, TT*): sigue la posición de un objetivo que se mueve, del que se conoce solamente su velocidad instantánea. Si se considera que el objetivo no se mueve, este escenario se corresponde con el de Punto de Estabilización definido anteriormente. En estos casos es imposible separar las restricciones temporales de las espaciales.

**Seguimiento de un camino** (*Path following, PF*): busca converger y seguir un camino predefinido, el cual solamente involucra restricciones espaciales.

**Seguimiento de un objetivo a lo largo de una trayectoria** (*Path Tracking, PT*): se trata de seguir a un objetivo que se mueve a lo largo de un camino predefinido. En este escenario se pueden separar las restricciones temporales de las espaciales y analizarse de manera independiente. Si no se dispone de la información futura acerca de la trayectoria del objetivo, este escenario se transforma en el de seguimiento de un objetivo.

**Maniobras en un camino** (*Path Maneuvering, PM*): intenta optimizar el seguimiento de un camino predefinido, teniendo en cuenta las limitaciones de maniobrabilidad

del vehículo, por tanto, las limitaciones espaciales suelen tener prioridad sobre las limitaciones temporales.

Debido a las características de las leyes de guiado se plantea que las variables involucradas se corresponden con las variables cinemáticas, dígame velocidad y posición. Por lo que existen leyes o algoritmos de velocidad y posición, utilizados indistintamente, de acuerdo a las restricciones referentes al escenario de control donde se vayan a aplicar.

Las leyes de guiado son actualmente implementadas en distintos vehículos, incluidos los *AUV*, pero tienen sus principios en la industria armamentista, específicamente en el área relacionada con los misiles, donde se plantea como tarea interceptar un objetivo en un tiempo determinado (Breivik, 2010). Un misil interceptor normalmente consta de 3 fases: lanzamiento, mitad de recorrido y final. La mayor demanda de precisión está asociada a la fase terminal, cuando el interceptor alcanza su objetivo, tal que el sistema de guiado del interceptor pueda lograr la intercepción con el menor error posible (Breivik, 2007).

Para lograr este objetivo, se han planteado distintas estrategias de guiado, las cuales son mostradas en la Figura 1-4.

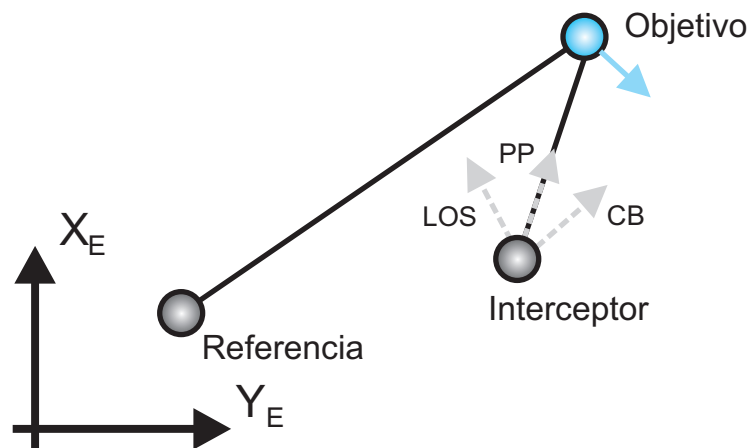


Figura 1-4: Principales estrategias de guiado: *LOS*, *PP*, *CB*.

**Línea de Visión** (*Line of Sight, LOS*): descrita como un esquema de tres puntos: referencia, interceptor y objetivo. Esta ley se basa en la existencia de un vector en línea recta que se intercepta con la línea de visión que existe entre la referencia y el objetivo. Es usualmente usado en el escenario de seguimiento de un camino.

**Persecución** (*Pure Pursuit, PP*): consiste en un esquema de guiado de dos puntos: interceptor y objetivo, que supone alinear la velocidad del interceptor con la del objetivo a través de una línea de visión entre ambos. Existe una variante de este algoritmo conocida como navegación en dirección fija, la cual alinea la velocidad del interceptor en dirección a una línea de visión con un ángulo constante, con el propósito de interceptar

el movimiento del objetivo. Es utilizado en escenarios de seguimientos de objetivos estacionarios.

**Dirección Constante** (*Constant Bearing, CB*): semejante al esquema de guiado *PP*, supone alinear el interceptor a una velocidad relativa (interceptor-objetivo) a lo largo de una línea de visión entre ambos. Es usado en el escenario de seguimiento de objetivos en movimiento. Cabe añadir que cuando el objetivo está estacionario los métodos *PP* y *CB* se asumen como exactamente iguales.

### 1.5. Leyes de guiado para el escenario *TT*

Actualmente son varios los algoritmos aplicados a vehículos marinos asociados con el escenario de control de seguimiento de objetivos móviles, algunos de ellos están desarrollados solamente en formas matemáticas, sin embargo, existen otros, que incluyen estrategias para el control.

Estos algoritmos se basan en el principio de guiado de dirección constante. El objetivo que se persigue con el esquema de guiado *CB* es hacer coincidir la posición del interceptor con la del objetivo, de modo que la distancia entre ellos, definida como el vector de posición relativa entre el interceptor y el objetivo (vector *LOS*), se haga cero. Esta estrategia de guiado se conoce también como navegación en paralelo, pues el vector *LOS* se moverá de forma paralela entre sí ([Breivik, 2010](#)).

Algunos de los algoritmos presentes en la literatura especializada se exponen a continuación:

*Breivik* ([Breivik, 2010](#)), plantea que el esquema de guiado *CB* comúnmente se implementa mediante una ley de dirección conocida como Navegación Proporcional (*PN*). En esta ley, un mando de aceleración perpendicular al vector de velocidad instantánea del vehículo se determina para lograr que el vector velocidad rote proporcionalmente a la razón *LOS* con el fin de anularla. En la literatura existen multitud de variaciones del guiado *PN*, cada una tiene en cuenta las diferentes hipótesis sobre el escenario interceptor-objetivo.

Esta estrategia de guiado *PN* ha sido implementada en vehículos marinos por diferentes autores. Uno de ellos es *Healey* ([Healey, 1992](#)), quien especifica que utilizando el método de navegación proporcional se logra de una manera simple calcular la acción de mando que debe seguir el controlador de rumbo del vehículo. El objetivo de esta señal de mando es lograr acercar al vehículo a la línea de visión determinada entre su posición actual y el próximo punto al cual se debe dirigir. Este autor comenta que para lograr respuestas rápidas en *AUV*, se necesita que el siguiente punto esté situado a una distancia igual a varias veces la longitud del vehículo. Por último, enfatiza en que la

separación entre las funciones de guiado y de control de rumbo no siempre asegura estabilidad en maniobras con el vehículo sumergido. Otro exponente de este algoritmo de guiado es *Wilson* ([Wilson, 2003](#)), pero en este caso, propone un nuevo método, conocido como *Line of Sight Counteraction Navigation (LOSCAN)*, derivado del principio básico de navegación proporcional y desarrollado con el objetivo de evitar obstáculos.

Sin embargo, el guiado *PN* solamente es para conseguir la intercepción con el objetivo. Esta coincidencia con la posición del objetivo pero no con su velocidad se denomina intercepción, donde una diferencia grande de velocidad hace que esta sea más violenta. Por otra parte, existe el concepto que se conoce como punto de encuentro donde se logra la coincidencia entre la velocidad y la posición del vehículo y la del objetivo. Esta idea se encuentra más relacionada con el escenario de seguimiento de objetivos en movimiento. En consecuencia, una ley de guiado capaz de resolver el problema del punto de encuentro necesita considerar control de dirección y de velocidad al mismo tiempo, y no solo de dirección como es el caso de la navegación proporcional. Precisamente esto constituye la esencia del algoritmo que propone *Breivik* ([Breivik, 2010](#)), quien establece leyes de dirección y velocidad que aseguran la coincidencia de esas dos magnitudes una vez que el vehículo alcance al objetivo. Las leyes de guiado aplicadas en el escenario *TT*, sirven para realizar operaciones que impliquen transferir cargas entre dos o más embarcaciones que se encuentran en movimiento. La tarea de la embarcación considerada como objetivo consiste en mantener un rumbo y velocidad constante, mientras que el vehículo que la persigue se acerca para recibir combustible o algún otro tipo de carga ([Skejic, 2009](#); [Fossen, 2011](#)).

Otros autores han hecho estudios acerca del escenario *TT*, como es el caso de *Alonge* ([Alonge, 2001](#)), el cual propone para el seguimiento de objetivos una estrategia de control en cascada, la cual se basa en dos leyes: una ley cinemática y una ley dinámica. En esencia plantea la obtención de tres controladores: un controlador de cabeceo-profundidad, un controlador de dirección y un controlador para la velocidad de avance. Diseñar un control supervisorio adaptativo que combina lógica basada en conmutación con técnicas iterativas tipo *backstepping*, constituye la propuesta realizada por *Aguiar* ([Aguiar, 2007](#)). *Liao* ([Liao, 2010](#)), realiza una transformación del sistema dinámico de velocidad y ángulo de rumbo en un sistema no lineal en cascada. Basándose en el análisis referente a la estabilidad que resulta de dicha transformación, demuestra que el problema de estabilización del sistema resultante se puede reducir al del subsistema velocidad-guiñada. Por su parte, *Repoulias* ([Repoulias, 2007](#)) combina el problema de la planificación de la trayectoria y el control para los vehículos marinos en el plano horizontal. En su investigación utiliza trayectorias circulares con velocidad constante

para lo cual utiliza curvas sinusoidales variantes en el tiempo y emplea métodos no convencionales de control.

Hasta la fecha, el *GARP* ha desarrollado un conjunto de implementaciones relacionadas con el proceso de guiado del vehículo. Los resultados obtenidos tienen que ver con el escenario de seguimiento de caminos, o sea, los objetivos de control que hasta el momento han sido planteados responden al cumplimiento de tareas sin restricciones temporales.

En todas las investigaciones anteriores realizadas por *GARP* relacionadas con el guiado se aborda la utilización de la estrategia de guiado *LOS*. Primeramente se utiliza con el fin de seguir puntos ([Valeriano-Medina, 2013b](#)), luego para lograr el seguimiento de caminos en línea rectas se implementa utilizando una ley de dirección basada en la distancia *lookahead*, a partir de la cual se calcula el ángulo de rumbo deseado ([Lemus, 2011](#)). A partir de los resultados obtenidos, se plantea la posibilidad de reducir el efecto de las perturbaciones marinas durante el seguimiento de un camino recto, introduciendo un efecto integral al controlador (*I – LOS*) ([Valeriano-Medina, 2015](#)). Todo ello con el objetivo de lograr que el error de seguimiento perpendicular al camino sea cero, independientemente a la presencia de las corrientes marinas. También *Fernández* ([Fernández, 2015](#)), implementa el controlador *I – LOS*, pero en su caso, evalúa su desempeño en el seguimiento de caminos curvos.

### 1.6. Consideraciones finales.

Luego de realizar un análisis de la literatura consultada, se arriban a las siguientes consideraciones.

Los estudios relacionados con los vehículos autónomos han tenido un gran auge en los últimos tiempos, sin embargo, el control en el sistema de guiado sigue siendo una temática compleja que continúa estudiándose.

Para cumplir con los objetivos de un vehículo marino y determinar su movimiento, se necesita identificar y definir aquellos escenarios de control de movimiento en los cuales debe operar. Hasta el momento *GARP* ha desarrollado investigaciones relacionadas con la temática de seguimiento de caminos, pero no se han estudiado otros escenarios como pudiera ser el de seguimiento de objetivos móviles. Para lo cual tendrían que evaluarse por primera vez algoritmos que aseguren el control de la velocidad con que opera el vehículo. Es por eso que en esta investigación se adopta el método propuesto por *Breivik* basado en la estrategia de guiado *CB*. De esta manera resulta posible establecer una ley de dirección y otra de velocidad que aseguren la coincidencia de ambas magnitudes una vez que el vehículo alcance al objetivo. El método adoptado es

sencillo de implementar y además su ley de posición se basa en el algoritmo *lookahead*, el cual se ha venido desarrollando por el *GARP* en anteriores investigaciones.

De esta manera se podrá continuar avanzando en el diseño e implementación de un sistema de guiado para el vehículo con el cual se puedan realizar un mayor número de maniobras.

## CAPÍTULO 2

# SEGUIMIENTO DE OBJETIVOS MÓVILES

### 2.1. Introducción

En el presente capítulo se define la estructura del modelo matemático no lineal de 6 *GDL* del *HRC – AUV*. Este modelo constituye la representación más exacta que se dispone del vehículo y permite la realización de simulaciones con un alto nivel de exactitud. A partir del mismo se obtienen modelos simplificados y lineales que son muy útiles en el ajuste de los controladores de rumbo y velocidad. Estos controladores se relacionan directamente con el sistema de guiado, del cual reciben los valores de referencia necesarios para lograr el seguimiento de un objetivo en movimiento.

El sistema de guiado que se aborda en este capítulo está compuesto por dos algoritmos. Una ley que se encarga de determinar el valor de rumbo deseado y otra que calcula el valor de referencia de la velocidad de avance. De esta manera se logra que el vehículo alcance al objetivo, y que en el punto en cual se encuentren exista coincidencia en posición y velocidad.

### 2.2. Modelo matemático

El modelado matemático de un vehículo marino se define como un conjunto de ecuaciones que representan al sistema lo más cercano posible a la realidad. Es necesario un estudio profundo del vehículo, tanto en régimen estático como dinámico. Las características estáticas corresponden al estado de equilibrio de los cuerpos cuando se encuentran en reposo, mientras que las dinámicas abarcan el comportamiento de los cuerpos al moverse de manera acelerada (Fossen, 1994). Para el proceso de modelo se utilizan las leyes físicas que rigen el movimiento de los cuerpos enunciadas por *Newton* desde el siglo *XVII*.

El movimiento de un *AUV* puede ser representado matemáticamente a partir de considerar al vehículo como un cuerpo sólido y rígido. Abarca los 6 *GDL*, por lo que se necesitan 6 coordenadas independientes para determinar totalmente la posición, velocidad y orientación del cuerpo.

### 2.2.1. Sistema de coordenadas

Cuando se analiza el movimiento de un vehículo marino, resulta conveniente definir dos sistemas de coordenadas, tal como se muestra en la Figura 2-1. El sistema coordenado móvil es fijado en el vehículo, cuyos ejes  $x_B$ ,  $y_B$  y  $z_B$  coinciden con los ejes de inercia y se definen como:

- $x_B$ : eje longitudinal (desde popa a proa, hacia delante).
- $y_B$ : eje transversal (orientado desde estribor, hacia la derecha).
- $z_B$ : eje normal o perpendicular (de arriba hacia abajo).

El origen del sistema del submarino ( $OB$ ) puede ser situado en el Centro de Gravedad ( $CG$ ) o en el Centro de Flotabilidad ( $CB$ ) del vehículo, aprovechando el plano principal de simetría. En la presente investigación,  $OB$  se hace coincidir con  $CB$ .

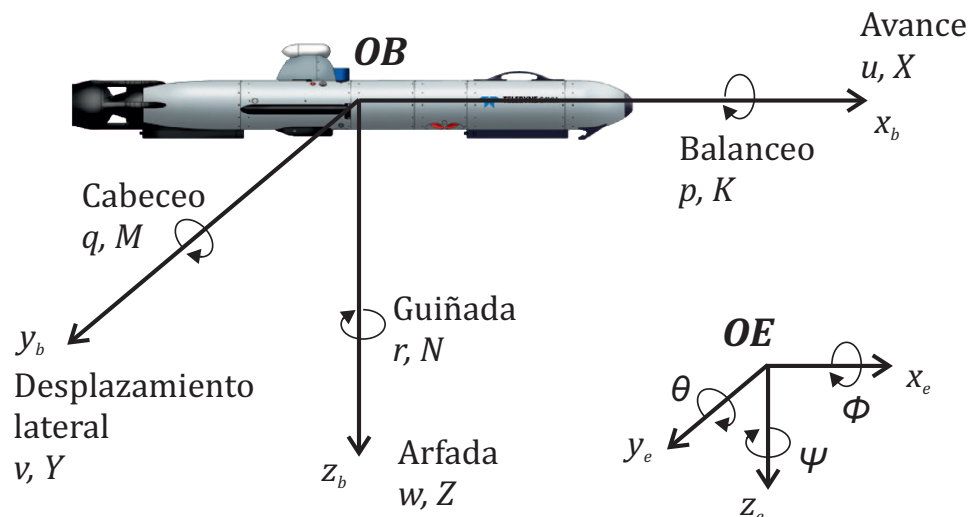


Figura 2-1: Sistemas de coordenadas con la definición de ángulos y velocidades.

El movimiento de los AUV en el mar se describe respecto a un sistema de referencia inercial. Se considera que las aceleraciones de un punto sobre las superficies de la Tierra pueden resultar despreciables, dado que el movimiento de la misma afecta poco a los vehículos que operan a baja velocidad (Fossen, 1994). Esta consideración permite definir un sistema de referencia fijo en tierra ( $OE$ ), siendo  $x_E$ ,  $y_E$ ,  $z_E$  sus ejes. De manera tal, que la posición y orientación del vehículo deben ser descritas respecto a  $OE$ , mientras que las velocidades lineales y angulares deben referirse respecto a  $OB$ . La Tabla 2-1 define la nomenclatura empleada para representar el movimiento de submarinos (SNAME, 1950).

Tabla 2–1: Notación utilizada para  $AUV$ .

Traslación	Fuerza	Velocidad lineal	Posición
Avance	$X$	$u$	$x$
Desplazamiento lateral	$Y$	$v$	$y$
Arfada	$Z$	$w$	$z$
Rotación	Momento	Velocidad angular	Ángulo
Balanceo	$K$	$p$	$\phi$
Cabeceo	$M$	$q$	$\theta$
Guiñada	$N$	$r$	$\psi$

El movimiento general de estos vehículos en los 6  $GDL$  se describe mediante los siguientes vectores (SNAME, 1950):

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_1 \\ \boldsymbol{\nu}_2 \end{bmatrix} \quad \text{donde} \quad \begin{aligned} \boldsymbol{\nu}_1 &= [u, v, w]^T \\ \boldsymbol{\nu}_2 &= [p, q, r]^T \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_1 \\ \boldsymbol{\eta}_2 \end{bmatrix} \quad \text{donde} \quad \begin{aligned} \boldsymbol{\eta}_1 &= [x, y, z]^T \\ \boldsymbol{\eta}_2 &= [\phi, \theta, \psi]^T \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_1 \\ \boldsymbol{\tau}_2 \end{bmatrix} \quad \text{donde} \quad \begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_1 &= [X, Y, Z]^T \\ \boldsymbol{\tau}_2 &= [K, M, N]^T \end{aligned} \quad (2.3)$$

En este caso,  $\boldsymbol{\eta}$  denota el vector de posición y orientación con coordenadas en el sistema de referencia fijo en tierra,  $\boldsymbol{\nu}$  representa al vector de velocidad lineal y angular con coordenadas en el sistema del submarino, y  $\boldsymbol{\tau}$  se utiliza para representar las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo en el sistema de coordenadas del submarino.

Las ecuaciones cinemáticas se pueden expresar en forma vectorial utilizando las transformaciones de ángulos de *Euler* como (Fossen, 2006):

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{\nu} \quad (2.4)$$

donde  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$  es la matriz de transformación de un sistema coordenado a otro y queda definida como:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix}$$

siendo:

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & (c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi) & (s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta) \\ s\psi c\theta & (c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi) & (s\theta s\psi c\phi - c\psi s\phi) \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}; \quad \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & t\theta s\phi & t\theta c\phi \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix}$$

notar que  $c^* = \cos(*)$ ,  $s^* = \sin(*)$  y  $t^* = \tan(*)$ .

### 2.2.2. Ecuaciones dinámicas de un vehículo autónomo subacuático

Las ecuaciones que determinan el movimiento del vehículo en sus 6 *GDL* pueden ser obtenidas a partir de las leyes de conservación de los momentos lineales y angulares (Fjellstad, 1994).

Para obtener las ecuaciones de movimiento es necesario asumir que el vehículo es un cuerpo rígido y el sistema de referencia fijado en tierra es inercial. Mediante la implementación de la segunda ley de *Newton* puede plantearse para un vehículo subacuático con sistema de coordenada fijo al cuerpo, la siguiente ecuación (Fossen, 1994, 2002, 2011):

$$\underbrace{\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{términos del cuerpo rígido}} + \underbrace{\mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{términos hidrodinámicos}} + \underbrace{\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}_{\text{términos hidrostáticos}} = \boldsymbol{\tau} \quad (2.5)$$

donde  $\mathbf{M}_{RB}$  designa a la matriz de masa del cuerpo rígido,  $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$  es la matriz de *Coriolis* del cuerpo rígido, y  $\boldsymbol{\tau}$  es el vector de fuerzas de control (Fossen, 2006).

La ecuación 2.5 puede ser representada de forma compacta como:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.6)$$

donde  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$  es la matriz de inercia incluyendo las masas añadidas,  $\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})$  es una matriz que incluye los términos de *Coriolis* del cuerpo rígido y los de masas añadidas,  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  agrupa los términos de amortiguamiento,  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  es el vector de fuerzas gravitacionales y de flotabilidad, por último,  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_X, \tau_Y, \tau_Z, \tau_K, \tau_M, \tau_N]^T$  es el vector de fuerzas y momentos provocados por las entradas de control. En el vehículo *HRC – AUV* la estructura de las matrices y vectores definidos anteriormente han sido determinados en investigaciones anteriores (Valeriano-Medina, 2013a).

### 2.3. Modelos lineales

Dado que los *AUV* deben realizar diversas y complejas maniobras, la ecuación 2.6 no resulta útil para el diseño de un sistema de control convencional y desacoplado. Por tanto, una solución adecuada consiste en dividir el sistema general en tres subsistemas.

Gracias a la simetría en la construcción del vehículo, estos subsistemas poseen poca interacción entre ellos (Isiyel, 2003). Los tres subsistemas y sus variables de estado están dados por:

- Subsistema lateral, utilizado para las maniobras de dirección del vehículo. Variables de estado:  $v$ ,  $r$  y  $\psi$ .
- Subsistema longitudinal, empleado para las maniobras de emersión-inmersión del vehículo. Variables de estado:  $w$ ,  $q$ ,  $\theta$  y  $z$ .
- Subsistema horizontal, utilizado para el diseño del sistema de navegación. Variables de estado:  $u$ ,  $v$  y  $r$ .

Para cumplir las tareas correspondientes al escenario de seguimiento de objetivos en movimiento, se hace necesario diseñar un controlador de rumbo y uno de velocidad. Para sus ajustes, resulta conveniente tener la representación matemática del subsistema lateral y de la ecuación de velocidad de avance que forma parte del subsistema horizontal.

### 2.3.1. Subsistema lateral

El modelo en espacio-estado que representa la dinámica del subsistema lateral para el *HRC – AUV* está dado por (Valeriano-Medina, 2013a):

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_v}{m-Y_{\dot{v}}} & -\frac{mu_0}{m-Y_{\dot{v}}} & 0 \\ 0 & \frac{N_r}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{m-Y_{\dot{v}}} \\ \frac{b_5}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (2.7)$$

donde  $Y_{\dot{v}}$  y  $N_{\dot{r}}$  son las fuerza y el momento correspondientes a las masas añadidas,  $Y_v$  y  $N_r$  representan la fuerza y el momento relacionados con el amortiguamiento, y sus valores numéricos son siempre negativos, por último,  $b_2$  y  $b_5$  son ganancias relacionadas con las fuerza y momento que aporta el timón horizontal en este plano.

A partir de este modelo, es posible obtener la función de transferencia entre el ángulo de guiñada del vehículo y el ángulo del timón horizontal como:

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{b_5}{(I_{zz} - N_{\dot{r}})s^2 - N_r s} \quad (2.8)$$

Los valores numéricos de la función de transferencia de la ecuación 2.8 se estimaron mediante identificación experimental (Valeriano-Medina, 2013b).

### 2.3.2. Ecuación de velocidad de avance

El movimiento en el plano horizontal de embarcaciones marítimas se describe en función del avance, del desplazamiento lateral y del ángulo de guiñada del vehículo. En la presente investigación solamente resulta de interés para este plano la velocidad de avance  $u$ . En función de este estado, la ecuación 2.6 queda como (Jalving, 1994):

$$m\dot{u} = X \quad (2.9)$$

donde  $m$  es la masa del vehículo y  $X$  representa las fuerzas externas que actúan sobre el mismo.

El término  $X$  se puede calcular mediante la ecuación:

$$X = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u u + X_{|u|u}|u|u + T_{|n|n}|n|n + T_{un}|n|u \quad (2.10)$$

donde  $X_{\dot{u}}$  representa la componente de fuerza provocada por las masas añadidas,  $X_u$  y  $X_{|u|u}$  tienen valores negativos y son la componente lineal y cuadrática de la fuerza de amortiguamiento respectivamente,  $T_{|n|n}$  y  $T_{un}$  representan las fuerzas de empuje generadas por el motor.

En el caso del *HRC – AUV* el término  $\tau_X$  está relacionado con la fuerza de empuje que aporta la hélice. Es posible determinar esta fuerza como  $\tau_X = T_{|n|n}|n|n| = b_1|n|n|$ . La ganancia  $b_1$  ha sido estimada mediante pruebas experimentales (Valeriano-Medina, 2013a). El hecho de que toda la fuerza de empuje esté contenida en el término  $T_{|n|n}$  permite no tener en cuenta a  $T_{un}$ .

A partir de estas consideraciones la ecuación 2.9 puede expresarse con la siguiente estructura:

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} = X_{|u|u}|u|u + X_u u + b_1|n|n \quad (2.11)$$

## 2.4. Controladores de rumbo y velocidad

Para cada uno de los tres subsistemas se puede diseñar un controlador. El controlador de rumbo se encarga de reducir el error en la dirección del vehículo, el controlador de profundidad es responsable de corregir la diferencia entre el valor deseado de profundidad y el real sentido en el vehículo, y el control de velocidad posibilita que el vehículo navegue con un valor de velocidad deseado.

### 2.4.1. Controlador de rumbo

Para el vehículo *HRC – AUV* ha sido seleccionado un controlador de rumbo del tipo *P-D* (Hernández, 2014). Su ajuste se realiza a partir de la relación dinámica que existe entre el ángulo de rumbo  $\psi$  y las variaciones en el timón horizontal  $\delta_T$ , presentada en la ecuación 2.8.

La ecuación de la señal de control está dada por:

$$\delta_T = K_p(\psi_d - \psi) - K_d r \quad (2.12)$$

donde  $K_p$  y  $K_d$  representan los valores de ganancia proporcional y derivativa respectivamente. El valor de  $\psi_d$  debe ser proporcionado por el algoritmo de posición que forma parte del sistema de guiado del vehículo.

### 2.4.2. Controlador de velocidad

La velocidad de avance del vehículo normalmente se controla de manera separada al rumbo. Se especifica una velocidad media constante, o poco variable, que se controla mediante los elementos responsables del empuje del vehículo..

La velocidad de avance del submarino depende de la velocidad de giro del motor y se define mediante la ecuación 2.11. El vehículo contiene un motor de propulsión *DC*. Por tanto, para controlar la velocidad, se necesita de un esquema tipo cascada, compuesto por un lazo interno donde la variable de control sería la velocidad de giro del motor, y un lazo externo para controlar la velocidad de avance.

#### Lazo interno

El actuador para el control de velocidad es el motor de propulsión. El modelo dinámico del motor puede ser escrito de la siguiente manera (Fossen, 1994):

$$L_a \frac{di_a}{dt} = -R_a i_a - 2\Pi K_M n + u_a \quad (2.13)$$

$$2\Pi J_m \frac{dn}{dt} = K_M i_a - Q(n, V_a) \quad (2.14)$$

donde  $L_a$  es la inductancia de armadura,  $R_a$  es la resistencia de armadura,  $u_a$  es el voltaje de armadura,  $K_M$  es la constante de torque del motor,  $J_m$  es el momento de inercia,  $n$  es la velocidad de giro del motor en revoluciones por segundo y el término  $Q(n, V_a)$  corresponde a la carga del motor.

Aplicando transformaciones de *Laplace* se tiene que:

$$n(s) = h_m(s)u_a(s) - h_Q(s)Q(s) \quad (2.15)$$

El término  $h_Q(s)Q(s)$  no se tiene en cuenta para esta investigación. Por tanto, la función de transferencia del motor se define como:

$$h_m(s) = \frac{n(s)}{u_a(s)} = \frac{K}{(1 + T_m s)(1 + T_a s)} \quad (2.16)$$

donde  $K$  es la constante del motor,  $T_m$  y  $T_a$  son las constantes de tiempo mecánica y eléctrica, respectivamente. Convenientemente se plantea que  $T_a < 0,1T_m$ , por lo tanto, el término  $T_a$  puede despreciarse.

Para el lazo interno se recomienda utilizar un controlador Proporcional-Integral (*PI*) (Fossen, 1994; Jalving, 1994), cuya estructura queda definida como:

$$u_a = K_p(n_d - n) + K_i \int_0^t (n_d - n) dt \quad (2.17)$$

La principal ventaja del lazo interno es que reduce la dinámica no lineal y la histéresis de los actuadores.

### Lazo externo

Debido a la importancia que tiene para la investigación lograr un control de velocidad, se necesita diseñar un lazo de control externo, donde la velocidad de avance del vehículo sea tomada como la variable de control.

En el modelo no lineal de 6 *GDL* la velocidad de avance es una de sus salidas, por lo que se puede utilizar como realimentación del lazo externo. El controlador a ajustar es un *PI*, asumiendo que el lazo interno tiene una dinámica despreciable con respecto al lazo externo (Fossen, 1994). Por lo que la señal de mando del controlador puede escribirse como:

$$|n|n = G_1(u_d - u) + G_2 \int_0^t (u_d - u) dt \quad (2.18)$$

donde  $G_1$  representa la ganancia proporcional del controlador y  $G_2$  a la ganancia integral.

En la actualidad, los motores empleados en vehículos marinos tiene incluidos la implementación del lazo interno, y por tanto no se hace necesario realizar la sintonía del mismo, por lo que en este trabajo solo se ajusta el lazo externo.

## 2.5. Algoritmos de guiado para el seguimiento de un objetivo móvil

En ocasiones no se tiene información acerca de la trayectoria que tiene que seguir el vehículo, por lo que el escenario  $TT$  se plantea con el propósito de seguir un objetivo móvil del cual no se tiene información sobre su movimiento futuro. Para cumplir con las tareas de este escenario es necesario contar con dos algoritmos, uno de posición y otro de velocidad. De esta manera se logra coincidencia entre la posición y la velocidad del vehículo con la del objetivo.

### 2.5.1. Algoritmo de posición basado en la distancia *lookahead*

El vector  $p_t = [x_t, y_t]^T \in \mathbb{R}^2$  define la posición del objetivo y el vector  $p = [x, y]^T \in \mathbb{R}^2$  corresponde a la posición del vehículo. Considerando que el eje  $x$  del objetivo ha sido rotado un ángulo positivo  $\chi_t = \text{atan2}(y_t, x_t)$ <sup>1</sup>  $\in \mathbb{S}$  relativo al eje  $x$  del sistema de referencia en tierra, entonces las componentes del error de posición del vehículo respecto al objetivo pueden ser calculadas de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} s \\ e \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\chi_t)^T (p - p_t) \quad (2.19)$$

donde  $\mathbf{R}(\chi_t)$  es la matriz que permite rotar la posición del vehículo respecto al objetivo:

$$\mathbf{R}(\chi_t) = \begin{pmatrix} \cos\chi_t & -\text{sen}\chi_t \\ \text{sen}\chi_t & \cos\chi_t \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

El error de posición del vehículo respecto al objetivo está formado por dos componentes:  $s(t)$ , que es la distancia longitudinal entre el vehículo y el objetivo, y  $e(t)$  que es la distancia transversal que separa a ambos, tal como se aprecia en la Figura 2-2.

A partir de las ecuaciones 2.19 y 2.20 se tiene entonces que:

$$e(t) = - (x - x_t)\text{sen}\chi_t + (y - y_t)\cos\chi_t \quad (2.21)$$

Para este algoritmo de posición solamente interesan las restricciones espaciales, entonces, el objetivo de control se centra en minimizar el valor de  $e(t)$ .

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (2.22)$$

---

<sup>1</sup>Es una función del software Matlab que calcula la arcotangente de dos elementos como:  $\text{atan2}(a,b)=\tan^{-1}(a/b)$

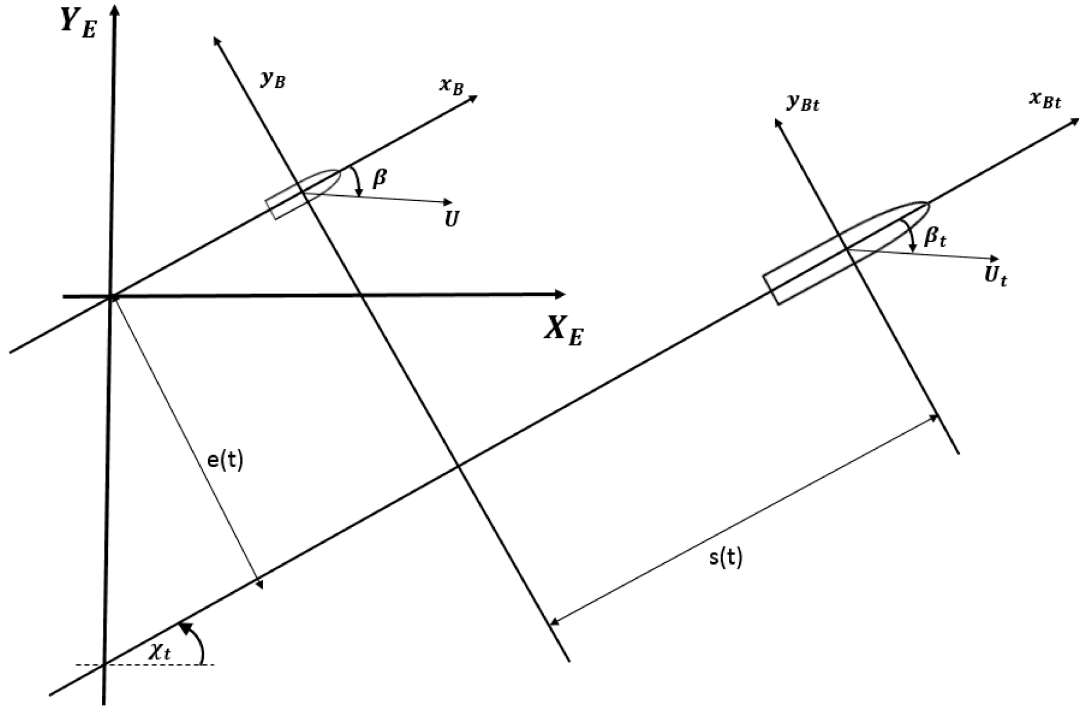


Figura 2-2: Principales variables del algoritmo de posición.

La ley de dirección basada en la distancia *lookahead* se utiliza con ese propósito. Para lo cual se calcula un ángulo de curso deseado, que está dado por la siguiente ecuación:

$$\chi(e)_d = \chi_r(e) + \chi_t \quad (2.23)$$

siendo  $\chi_r(e)$  un ángulo de corrección que asegura que la velocidad del vehículo esté en dirección hacia el objetivo, y se calcula como (Skejic, 2009):

$$\chi_r(e) = \arctan \frac{-e(t)}{\Delta} \quad (2.24)$$

La distancia *lookahead* ( $\Delta$ ) es un parámetro de ajuste que se expresa en metros (m) y se selecciona entre 2 y 6 veces la longitud del vehículo (Healey, 2006).

La relación entre el ángulo de rumbo deseado, el ángulo de curso deseado y el ángulo de deslizamiento está dada por:

$$\psi_d = \chi(e)_d - \beta \quad (2.25)$$

donde  $\beta$  es el ángulo de deslizamiento, formado entre  $x_B$  y el módulo del vector de velocidad lineal ( $U$ ) del vehículo para el plano horizontal, y se calcula como:

$$\beta = \arcsen\left(\frac{v}{U}\right) \quad (2.26)$$

### 2.5.2. Algoritmo de velocidad

Se considera un objetivo representado por la posición  $p_t = [x_t, y_t]^T \in \mathbb{R}^2$  y con velocidad  $v_t(t) = \dot{p}_t(t) \in \mathbb{R}^2$ . Consecuentemente, el vector *LOS*, equivale al error de posición entre el interceptor y el objetivo y es definido como:

$$p(\tilde{t}) = p_t(t) - p(t) \quad (2.27)$$

Este vector coincide con el parámetros  $s(t)$ , y se puede expresar en función de las posiciones del objetivo y del vehículo, y del ángulo  $\chi_t$ , de la siguiente forma (Fossen, 2011):

$$s(t) = (x - x_t) \cos \chi_t + (y - y_t) \sin \chi_t \quad (2.28)$$

Por tanto, el objetivo de control relacionado con las restricciones temporales del escenario *TT* puede definirse como:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = 0 \quad (2.29)$$

Esta determinación corresponde a un intercepción asintótico, que es equivalente con un punto de encuentro enunciado en el Capítulo 1.

La velocidad que debe poseer el vehículo para alcanzar al objetivo está definida como:

$$v_d(t) = v_t(t) + v_a(t) \quad (2.30)$$

esto significa que el mismo se aproxima al objetivo con una componente de velocidad  $v_a(t)$ , tal como se muestra en la Figura 2-3.

De acuerdo con la estrategia de guiado *CB*, la velocidad de aproximación puede ser calculada como:

$$v_a(t) = -\kappa(t) \frac{s}{\|s\|} \quad (2.31)$$

donde  $\|s\| = \sqrt{(s)^T s} \geq 0$  es la longitud Euclidiana del vector *LOS*, el parámetro  $\kappa(t) \geq 0$  es usado para modular la velocidad de aproximación. Específicamente, un punto de encuentro puede conseguirse si la velocidad de aproximación es escogida proporcionalmente a la distancia vehículo-objetivo  $s(t)$  y si se cumple que:

$$\kappa = U_{a,max} \frac{\|s\|}{\sqrt{(s)^T s + \Delta_s^2}} \quad (2.32)$$

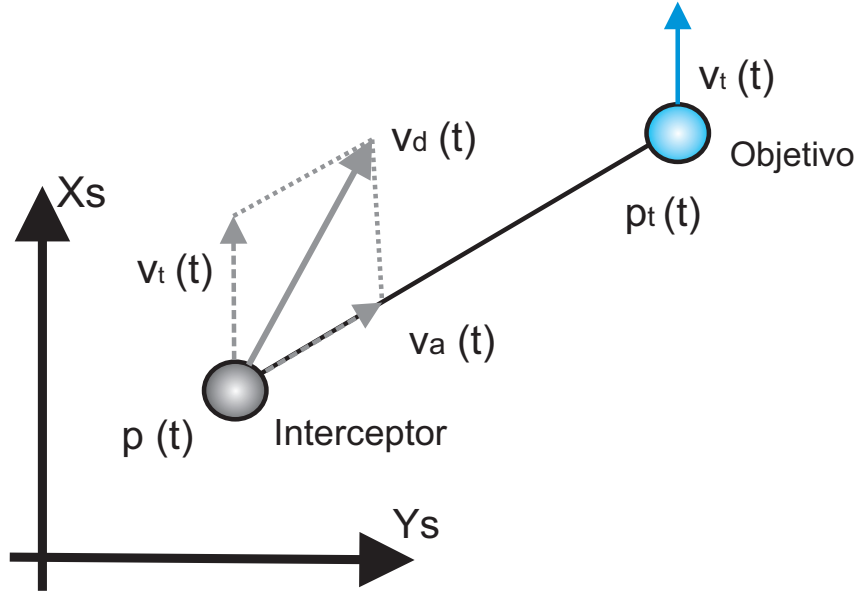


Figura 2-3: Estrategia de guiado para el escenario TT.

donde  $U_{a,max}$  especifica la máxima velocidad de aproximación hacia el objetivo, mientras que  $\Delta_s > 0$  constituye un parámetro de ajuste, que se utiliza para regular el comportamiento transitorio del vehículo durante su recorrido hasta alcanzar al objetivo en el punto de encuentro. Es importante asumir que el vehículo tiene una velocidad superior al objetivo, lo cual significa que la máxima velocidad del vehículo  $U_{max}$  es mayor que el conjunto de velocidad  $U_t(t) + U_{a,max}$  en todo momento.

Por tanto la ecuación 2.30 se puede reescribir de manera modular como:

$$U_d = U_t - U_{a,max} \frac{s}{\sqrt{s^2 + \Delta_s^2}} \quad (2.33)$$

Es conocido que el módulo de la velocidad del vehículo para el plano horizontal es  $U_d = \sqrt{u_d^2 + v_d^2}$ , mientras que para el objetivo se determina como  $U_t = \sqrt{u_t^2 + v_t^2}$ . Durante la mayoría de las maniobras que realizan los AUV la componente de velocidad en  $x$  es mucho mayor que la componente en  $y$ . Por este motivo se asume como condición de operación que  $u_d \gg v_d$ , lo cual implica que  $U_d \approx u_d$ . De esta manera, la velocidad de avance deseada con que debe operar el vehículo para alcanzar al objetivo está dada por:

$$u_d = U_t - U_{a,max} \frac{s}{\sqrt{s^2 + \Delta_s^2}} \quad (2.34)$$

## 2.6. Consideraciones finales del capítulo

La existencia de un modelo no lineal de 6 *GDL* del *HRC – AUV* permite tener una representación exacta del vehículo que puede ser utilizada para evaluar el desempeño del sistema de guiado mediante simulación.

Para cumplir con las tareas del escenario *TT*, es necesario lograr la coincidencia de posición y velocidad entre el vehículo y el objetivo, para lo cual se definen dos algoritmos, uno de posición y otro de velocidad, los cuales determinan los valores de referencia deseados de los controladores de rumbo y velocidad.

La utilización de una estrategia de guiado que está formada por una ley de posición y otra de velocidad, brinda la posibilidad de que el vehículo pueda seguir objetivos en movimiento. Varios de los parámetros que forman parte de las ecuaciones del algoritmo constituyen salidas del modelo, mientras que otros son ajustables en función de las características del vehículo.

# CAPÍTULO 3

## AJUSTE Y EVALUACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE GUIADO

### 3.1. Introducción

La presente investigación se realiza con el propósito de diseñar una estrategia de guiado que le permita al *HRC – AUV* seguir y alcanzar a un objetivo en movimiento. En la Figura 3–1 se presenta el esquema utilizado en las simulaciones. Este esquema está compuesto por varios bloques, de acuerdo con la definición dada en el Capítulo 1 para un Sistema de Control de Movimiento. El sistema de guiado está formado por dos bloques principales: la generación de la trayectoria del objetivo y los algoritmos de posición y velocidad que permiten su seguimiento. Las salidas de este último bloque lo constituyen los valores deseados de rumbo y velocidad que utilizan los controladores para lograr que el vehículo alcance al objetivo en un punto de encuentro. En el Anexo A se exponen los códigos que forman parte de cada uno de los bloques del sistema de guiado. Durante las simulaciones no se tienen en cuenta los efectos que provocan las perturbaciones marinas.

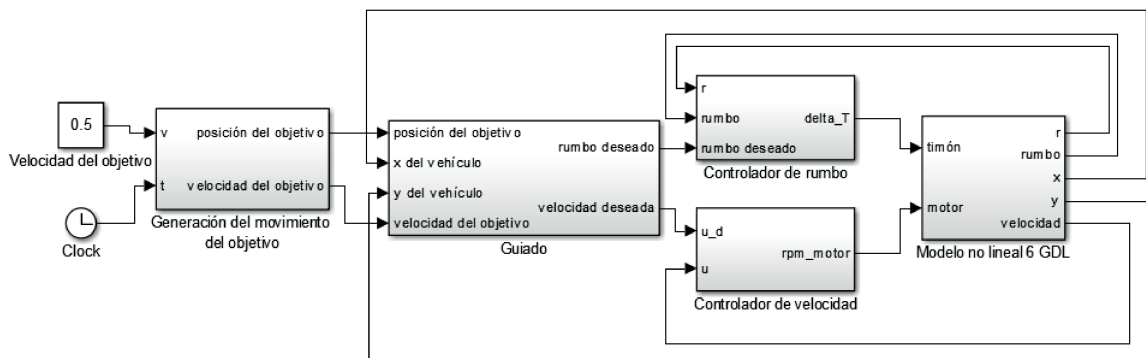


Figura 3–1: Esquema utilizado en las simulaciones para el seguimiento de un objetivo móvil.

En el actual capítulo se incluye una descripción del controlador de rumbo diseñado para el *HRC – AUV* y se ajusta el de velocidad. Además, se presentan los valores seleccionados para los parámetros que forman parte de los algoritmos de posición y

velocidad. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos mediante simulación de la estrategia de guiado en su conjunto. Todas estas pruebas y simulaciones para el seguimiento de un objetivo móvil, se desarrollan en el software *Matlab* (MathWorks, 2013). Para las simulaciones de estos sistemas, se utilizan los términos matriciales y vectoriales que forman parte del modelo no lineal de 6 *GDL* del *HRC-AUV* (Valeriano-Medina, 2013a).

### 3.2. Valores de los parámetros que conforman las matrices y vectores del modelo no lineal de 6 *GDL* para el *HRC-AUV*

La ecuación 2.5 constituye la representación matemática del modelo dinámico no lineal de 6 *GDL* para un vehículo autónomo subacuático. En este epígrafe se presentan las matrices y vectores que conforman la ecuación 2.5, teniendo en cuenta los valores geométricos e inerciales del *HRC-AUV* mostrados en la Tabla 1-1 (Valeriano-Medina, 2013a,b).

La matriz de inercia  $\mathbf{M}$  queda determinada como:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 4345,4 & 0 & 0 & 0 & 91 & 0 \\ 0 & 7929 & 0 & -91 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7929 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -91 & 0 & 450,1 & 0 & -275 \\ 91 & 0 & 0 & 0 & 36582 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -275 & 0 & 36388 \end{bmatrix}$$

mientras que la matriz  $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ , que incluye los términos de *Coriolis* y de masas añadidas, está definida por:

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 91r & 7929w & -7929v \\ 0 & 0 & 0 & -7929w & 91r & 4535,4u \\ 0 & 0 & 0 & 7929v - 91p & -4535,4u - 91q & 0 \\ -91r & 7929w & -7929v + 91p & 0 & -275p + 36388r & -36582q \\ -7929w & -91r & 4535,4u + 91q & 275p - 36388r & 0 & 450,1p - 275r \\ 7929v & -4535,4u & 0 & 36582q & -450,1p + 275r & 0 \end{bmatrix}$$

El vector de fuerzas gravitacionales y de flotabilidad  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  es calculado como:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \left[ 0, 0, 0, 890,5c\theta s\phi, 890,5s\theta, 0 \right]^T$$

Los valores numéricos de los parámetros que forman parte de la matriz de amortiguamiento  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  y del vector  $\boldsymbol{\tau}$  son obtenidos mediante identificación experimental. Para ello se utilizan los datos recopilados en experimentos sencillos realizados en el mar con

el  $HRC - AUV$  (Valeriano-Medina, 2013a). Como resultado se tiene:

$$\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu}) = -diag\{-181,45, -1219,8, -1219,8, -126,62, -9096,9, -9096,9\}$$

mientras el vector de fuerzas y momentos producidos por las entradas de control,  $\boldsymbol{\tau}$ , queda definido como:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_Z \\ \tau_K \\ \tau_M \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_4 \\ 0 & b_5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \\ \delta_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1946 & 0 & 0 \\ 0 & 318,39 & 0 \\ 0 & 0 & 661,12 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2644,5 \\ 0 & 1273,56 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \\ \delta_E \end{bmatrix}$$

Todos estos términos de la ecuación 2.5 han sido evaluados y validados mediante simulación y pruebas experimentales (Valeriano-Medina, 2013a).

### 3.3. Controladores

El diseño de un sistema para el control del movimiento de un vehículo subacuático, el cual debe seguir a un objetivo que se mueve, considera un controlador de rumbo y otro de velocidad simultáneamente. El sistema de guiado asegura los valores de rumbo y velocidad deseados, que en conjunto con los controladores son los encargados de garantizar la exactitud necesaria durante la realización de una maniobra.

#### 3.3.1. Controlador de rumbo

Un controlador de rumbo tiene el objetivo de asegurar un adecuado desempeño del vehículo durante la ejecución de maniobras donde ocurren cambios en la dirección del mismo. Para el  $HRC - AUV$  ha sido implementado un controlador de rumbo del tipo  $P-D$  (Hernández, 2014).

La expresión que representa la relación dinámica que existe entre el ángulo de rumbo  $\psi$  y la variaciones en el timón horizontal, presentada en la ecuación 2.8, queda definida con valores numéricos para el caso del  $HRC - AUV$  como:

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{0,14}{(4s + 1)s} \quad (3.1)$$

Esta función de transferencia se obtuvo a partir de experimentos realizados en el mar con el  $HRC - AUV$  (Valeriano-Medina, 2013b), cuyos datos se procesaron mediante identificación experimental.

La ecuación 3.1 se utiliza para ajustar el controlador  $P - D$ , cuya señal de control está dada por la ecuación 2.12:

Los valores de ganancia calculados por *Hernández* (*Hernández, 2014*) son  $K_p = 1,5$  y  $K_d = 1$ . Los resultados obtenidos en la simulación a partir del ajuste se presentan en la Figura 3-2, para un valor de  $\psi_d = 1$ .

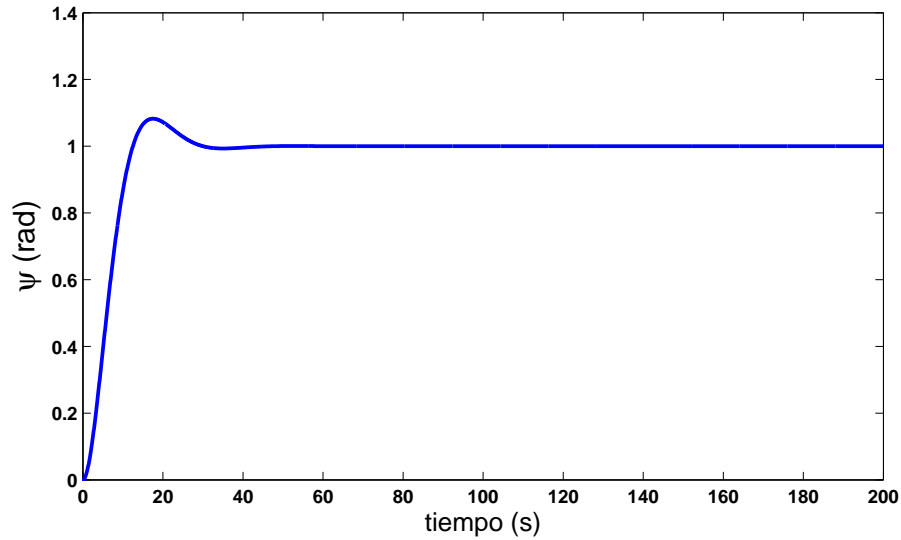


Figura 3-2: Respuesta del sistema de control de rumbo ante una entrada paso.

### 3.3.2. Controlador de velocidad

El control de velocidad, por su parte, logra que el vehículo siga una velocidad deseada, la cual varía durante el seguimiento de un objetivo que se mueve. Para el *HRC - AUV*, el controlador de velocidad que se propone es del tipo  $PI$ .

En la sección 2.4.2 se analiza el diseño del controlador de velocidad. El lazo interno del motor, encargado de regular la velocidad de giro, se sustituye por un elemento de saturación. De esta manera se asegura que el mando generado por el lazo externo de velocidad no exceda las 1000 rpm, que constituye el valor máximo al que puede operar el motor instalado en el *HRC - AUV*.

La ecuación 2.11 establece la relación numérica entre la velocidad deseada del vehículo y la velocidad de giro del motor.

$$4345,3\dot{u} = -47,49|u|u - 181,45u + 0,1946|n|n \quad (3.2)$$

Esta ecuación se utiliza para ajustar el controlador de velocidad tipo  $PI$ , cuya señal de mando se define mediante la ecuación 2.18.

El ajuste del *PI* utilizando la herramienta *Tune* del software *MatLAB*, la cual permite realizar una auto-sintonía del controlador en función de los parámetros establecidos por el diseñador. En este caso se establecieron como requisitos de desempeño, un valor de máximo sobreimpulso pequeño (por debajo del 5%) y velocidad de respuesta rápida atendiendo a la dinámica lenta que presenta este tipo de vehículo.

Los resultados obtenidos en el diseño son:  $G_1 = 300$  y  $G_2 = 0,03$ . En la Figura 3-3 se presenta la respuesta obtenida mediante simulación para un valor de velocidad deseada  $u_d = 1,9$  m/s .

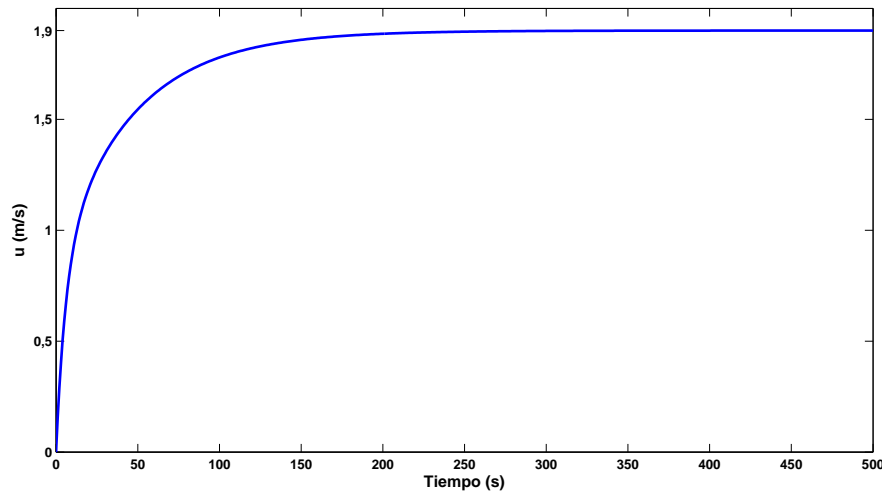


Figura 3-3: Respuesta del control de velocidad ante una entrada paso.

### 3.4. Ajuste y evaluación de los algoritmos de posición y de velocidad

Los algoritmos de posición y velocidad se deben ajustar adecuadamente para conseguir que el vehículo alcance al objetivo en un tiempo determinado. Otro aspecto importante a considerar en el diseño está dado por la necesidad de lograr que una vez que el vehículo alcance al objetivo las magnitudes de posición y velocidad de ambos coincidan. Esto último constituye una característica inherente al escenario de seguimiento de objetivos móviles.

La trayectoria a seguir por el vehículo está dada por el movimiento del objetivo. En esta investigación se establece que el objetivo siempre se moverá en línea recta a una velocidad constante igual a 0.5 m/s. La velocidad máxima de avance del vehículo es aproximadamente de 2 m/s, de esta manera se logra que el vehículo siempre navegue a una velocidad mayor que la del objetivo, tal como se expone en la sección 2.5.2. Para ello se establece como valor de velocidad de aproximación 1 m/s.

El ajuste del algoritmo de posición basado en la distancia *lookahead* se realiza mediante la selección del parámetro  $\Delta$ . El valor de  $\Delta$  determina el ángulo de corrección que debe

tener el vehículo para dirigirse hacia el objetivo, de acuerdo con lo expresado en la ecuación 2.24. Teniendo en cuenta las capacidades de maniobrabilidad del *HRC-AUV*, este parámetro se elige con valor 50, lo que equivale a 5 veces la longitud del vehículo.

Para ajustar el algoritmo de velocidad, se debe seleccionar un valor para el parámetro  $\Delta_s$ , cumpliendo con el criterio de que debe ser mayor que cero. Para su selección se realizaron simulaciones con diferentes valores de  $\Delta_s$ . El valor elegido es  $\Delta_s = 50$  m.

Para demostrar la efectividad del ajuste realizado se muestra en la Figura 3-4 los resultados obtenidos durante la simulación de una maniobra de seguimiento. Como se puede apreciar, el vehículo se dirige en dirección a la trayectoria del objetivo, y una vez que lo alcanza, ambos continúan navegando juntos.

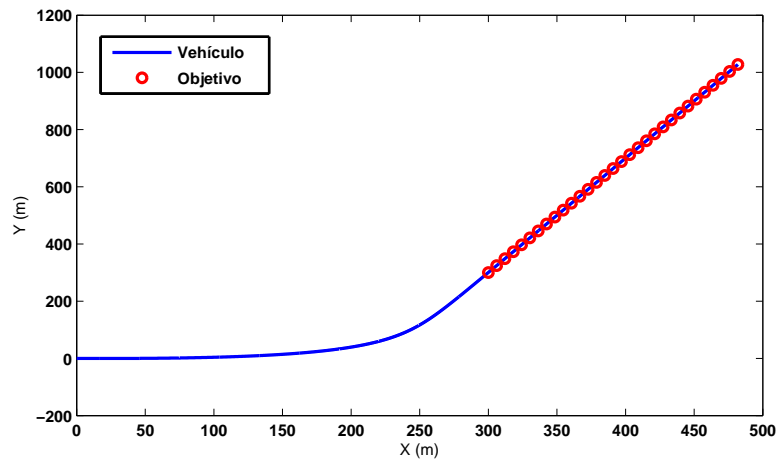


Figura 3-4: Seguimiento del vehículo hacia el objetivo.

La simulación se realiza con un período de muestreo de  $0.01$  s, considerando además que el objetivo parte desde un punto con coordenadas  $[x; y] = [300; 300]$ .

Para demostrar la convergencia del vehículo hacia el objetivo, resulta necesario analizar el comportamiento de los errores de seguimiento transversal y longitudinal. En la Figura 3-5 se presenta la gráfica del error transversal, el cual converge a cero. De esta manera se cumple con el criterio de ajuste establecido para el algoritmo de posición.

En la Figura 3-6 se presenta cómo se comporta el error longitudinal. En este caso también se logra la convergencia a cero.

Como se ha señalado anteriormente, en el escenario de control de seguimiento de objetivos en movimiento se necesita que las magnitudes de velocidad y posición entre el vehículo y el objetivo coincidan a partir del punto donde se encuentran. En la Figura 3-7 se presenta el comportamiento de la velocidad de ambos. Como se puede apreciar, la velocidad del vehículo va variando hasta que se hace igual que la del objetivo. De esta manera se demuestra el cumplimiento de este requisito.

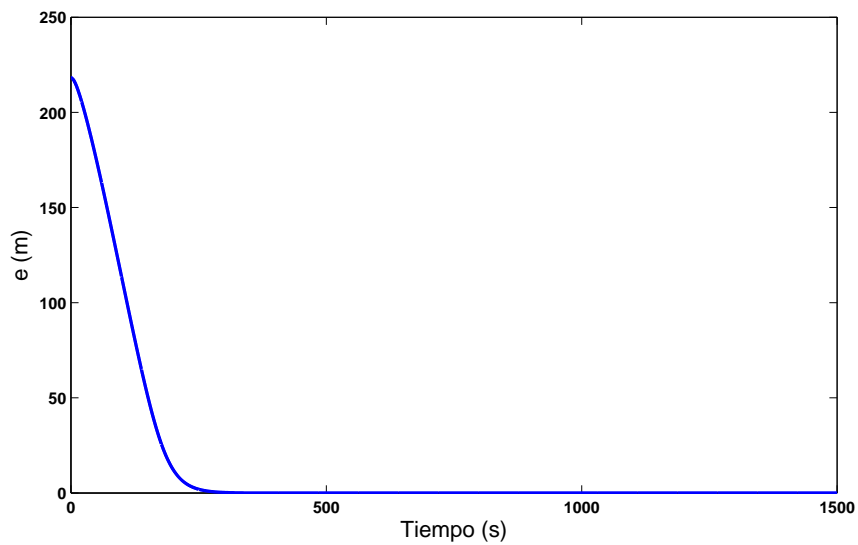


Figura 3-5: Error de seguimiento transversal.

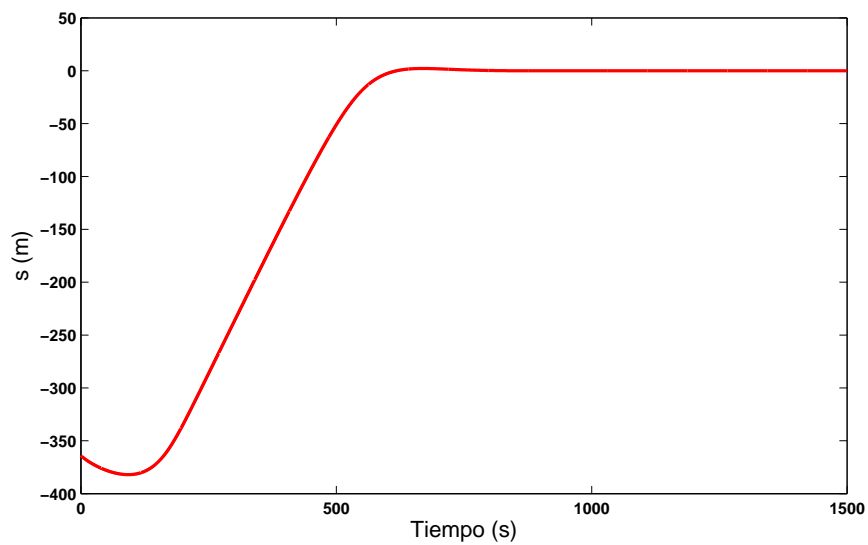


Figura 3-6: Error de seguimiento longitudinal.

### 3.5. Análisis económico

Es conocido que en la actualidad existe una amplia gama de aplicaciones donde se desempeñan los *AUV*, que sigue ampliándose con el paso de los años. Esta tendencia ha permitido que varias compañías a nivel mundial estén desarrollando estos vehículos y convirtiéndolos en un producto comercializable, que alcanzan precios elevados de acuerdo a sus características y prestaciones.

El costo de adquisición típico puede alcanzar cifras de hasta 2 millones de dólares (*USD*) y puede aumentar en los casos de vehículos con mayor calidad. Sin embargo, estas cifras no contemplan el costo de reparaciones, piezas de repuesto y mantenimiento

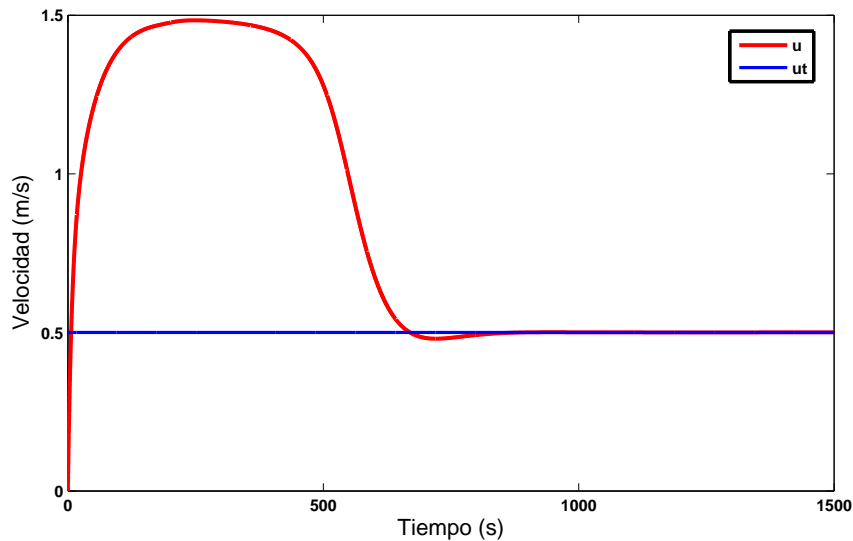


Figura 3–7: Velocidad del objetivo y del *HRC – AUV*.

que necesita el vehículo, y que normalmente son suministradas por la compañía propietaria. Generalmente, el fabricante comercializa el producto con el sistema de autopiloto diseñado, por tanto, limita la posibilidad de actualizaciones, reparaciones y reproducciones por parte de los compradores, creando dependencia tecnológica y económica.

Estas circunstancias hacen que Cuba, aún siendo un país rodeado de mar, no tenga la posibilidad de adquirir estos vehículos, y tenga un atraso tecnológico en esta rama. Es por esto, y por las ventajas que incorporaría a la comunidad científica del país, que se diseña el *HRC – AUV*. Este prototipo ha sido diseñado por instituciones cubanas, y con un sistema sensorial de bajo costo, que contribuye a que el proyecto sea viable desde el punto de vista económico para Cuba. Las deficiencias que surgen debido a la utilización de este equipamiento sensorial de gama media o baja, deben ser compensadas mediante soluciones asequibles para hardware y técnicas de modelado y control, aplicadas por los miembros del proyecto.

La propuesta de control presentada para el sistema de guiado del *HRC – AUV*, está dirigida a introducir por primera vez en el vehículo una estrategia que le permita seguir objetivos en movimiento, con el fin de aumentar el número de aplicaciones para las cuales está diseñado.

### 3.6. Consideraciones finales del capítulo

La estrategia de guiado diseñada, permite al vehículo *HRC – AUV* cumplir con los requerimientos que impone el escenario de seguimiento de objetivos móviles. La efectividad de estos ajustes se verifica mediante simulación. Los resultados obtenidos muestran que los errores de seguimiento transversal y longitudinal se estabilizan en cero y que

tanto el vehículo como el objetivo operan a igual velocidad luego que se encuentran. Con esto se demuestra la convergencia del vehículo al objetivo y se logra que coincidan las magnitudes de posición y velocidad entre ambos.

## CONCLUSIONES

Como resultado final de esta investigación se logra el seguimiento de un objetivo en movimiento por parte del *HRC – AUV*. A partir de este resultado, se plantean las siguientes conclusiones generales:

- A partir del estudio realizado sobre las estrategias de control utilizadas en los sistemas de guiado de vehículos marinos, se establece una ley de guiado que permite el seguimiento de un objetivo en movimiento por parte del *HRC – AUV*. Esta ley incluye un algoritmo de posición y un algoritmo de velocidad ajustados a partir de las características del vehículo y del objetivo.
- Los controladores de rumbo y velocidad se ajustan a partir de los modelos lineales del vehículo. Los valores deseados para estos controladores son determinados por los algoritmos de posición y velocidad del sistema de guiado. La efectividad del ajuste queda demostrada mediante simulación.
- La utilización de un algoritmo de guiado formado por una ley de posición y otra de velocidad asegura que una vez que el vehículo alcance al objetivo exista coincidencia entre las magnitudes de posición y velocidad de ambos.
- Las simulaciones presentadas muestran la convergencia a cero de los errores de seguimiento longitudinales y transversales durante el seguimiento de un objetivo en movimiento. Estos resultados demuestran la factibilidad de utilizar estos algoritmos en el *HRC – AUV* con vistas a realizar maniobras correspondientes al escenario de seguimiento de objetivos móviles.

A partir de las conclusiones presentadas, se justifica plenamente la necesidad de la investigación y por tanto se satisfacen los objetivos del trabajo, quedando corroborada la hipótesis inicial establecida.

## RECOMENDACIONES

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

- Evaluar de conjunto con el *CIDNAV* las modificaciones necesarias a realizar en el sistema sensorial del *HRC – AUV* con vistas a lograr la implementación de esta estrategia de guiado y su evaluación durante pruebas experimentales.
- En futuras investigaciones continuar el estudio de esta estrategia de guiado con vistas a lograr el seguimiento de objetivos que se mueven a lo largo de una trayectoria previamente definida. Para ello se necesitaría conocer la información sobre el movimiento futuro a realizar por parte del objetivo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, P.; Hespanha, J. P. (2007). Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control* **52**(8), 1362–1379.
- Alonge, F.; D’Ippoloto, F.; Raimondi F.M. (2001). Trajectory tracking of underactuated underwater vehicles. In: *40th IEEE Conference on Decision and Control*. Vol. 5. IEEE. Florida, Estados Unidos. pp. 4421–4426.
- Alvarez, C.; Saltaren, R.; Aracil R.; García C. (2009). Concepción, desarrollo y avances en el control de navegación de robots submarinos paralelos: El robot remo-i. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* **6**(3), 92–100.
- Amat, J.; Monferrer, A.; Batlle J.; Cufí X. (1999). Garbi: a low-cost underwater vehicle. *Microprocessors and Microsystems* (23), 61–67.
- Antonelli, G.; Fossen, T. I.; Yoerger D. R. (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Chap. Underwater Robotics, pp. 987–1008. Springer-Verlag.
- Blidberg, D. R. (2001). The development of autonomous underwater vehicles (auv); a brief summary. In: *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE Xplore. Seul, Corea del Sur.
- Breivik, M. (2010). Topics in Guided Motion Control of Marine Vehicles. Tesis doctoral. Norwegian University of Science and Technology.
- Breivik, M.; Fossen, T. I. (2007). Applying missile guidance concepts to motion of marine craft. In: *Control Applications in Marine Systems*. Vol. 7. IFAC. Croacia. pp. 349–354.
- Breivik, M.; Fossen, T. I. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Guidance Laws for Autonomous Underwater Vehicles, pp. 51–76. InTech. Vienna, Austria.
- Cruz, J. M.; Aranda, J.; Girón J. M. (2012). Tutorial automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **9**(3), 205–218.
- Fernandes, P. G.; Stevenson, P.; Brierley A. S.; Armstrong F.; Simmonds E. J. (2003). Autonomous underwater vehicles: future platforms for fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science* **60**, 684–691.
- Fernández, J. E. (2015). Controlador I-LOS considerando la distancia lookahead variable para el seguimiento de caminos curvos en un AUV. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.

- Fjellstad, O. (1994). Control of unmanned underwater vehicles in six degrees of freedom a quaternion feedback approach. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons.. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I. (2002). *Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics. Noruega.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I.; Johansen, T. A.; Pérez T. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. A survey of control allocation methods for underwater vehicles, pp. 109–128. InTech. Vienna, Austria.
- 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.
- García, D. (2014). Desarrollo de técnicas de filtrado de las olas para la navegación y el control de un *AUV*. Tesis de maestría. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- García-García, D.; Valeriano-Medina, Y.; Hernández L.; Martínez-Laguardia A. (2012). Wave filtering for heading control of an *AUV* based on passive observer. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* **41**(6), 540–549.
- Group, ECA (2016). A18-m autonomous underwater vehicles. Página Web: [www.ecagroup.com/en/solutions/a18-m-auv-autonomous-underwater-vehicle](http://www.ecagroup.com/en/solutions/a18-m-auv-autonomous-underwater-vehicle). Último acceso: 31 de mayo de 2016.
- Guillén, J. (2011). Visión artificial aplicada en vehículos autónomos submarinos. Folleto. Universidad Rey Juan Carlos de Madrid. España.
- Healey, A. J. (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. Chap. Guidance Laws, Obstacle Avoidance, Artificial Potential Functions, pp. 43–66. Vol. 69. Peter Peregrinus LTD. Gran Bretaña.
- Healey, A. J.; Marco, D. B. (1992). Slow speed flight control of autonomous underwater vehicles: Experimental results with nps auv ii. In: *Second International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vol. II. The International Society of Offshore and Polar Engineers. San Francisco, Estados Unidos. pp. 523–532.
- Hegrenæs, O.; Hallingstad, O.; Jalving B. (2007). Comparison of mathematical models for the *hugin 4500 auv* based on experimental data. In: *THE IEEE International Symposium on Underwater Technology*. IEEE Xplore. Japón. pp. 558 – 567.

- Hernández, A. (2014). Estrategia de control para el seguimiento de camino de un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Hornfeld, Willi (2016). Seafox iq/seawolf, new mini and midi auvs for security and inspection. Página Web: [www.auvac.org](http://www.auvac.org). Último acceso: 31 de mayo de 2016.
- Isiyel, K. (2003). Autopilot design and guidance control of *ULISAR UUV* (unmanned underwater vehicle). Tesis de maestría. Middle East Technical University. Turquía.
- Jalving, B. (1994). The ndre-auv flight control system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **19**(4), 494–501.
- Juvier, A. E. (2013). Modelado y control basados en lógica difusa para el movimiento en el plano horizontal de un auv. Trabajo de diploma. UCLV. Santa Clara, Cuba.
- La Valle, S. M. (2006). Planning algorithms. Tesis de maestría. Cambridge University Press. Gran Bretaña.
- Lekkas, A. M. (2014). Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- Lemus, J. L. (2011). Software de navegación y guiado en tiempo real para vehículo autónomo sumergible. Trabajo de diploma. UCLV. Santa Clara, Cuba.
- Liao, Y.; Pang, Y.; Wan L. (2010). Combined speed and yaw control of underactuated unmanned surface vehicles. In: *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. Vol. 1. IEEE. Wuhan, China. pp. 157–161.
- López, L. (2013). Técnicas de control lineales cuadráticas aplicadas en el diseño de autopiloto para un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Santa Clara, Cuba.
- Martínez, A.; Rodríguez, Y.; Hernández L.; Guerra C.; Lemus-J.; Sahli H. (2013). Arquitectura de hardware y software para *auv*, resultados experimentales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **10**(3), 333–343.
- 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*. IEEE Xplore. Singapur. pp. 1428 – 1433.
- Martínez, A. (2015). Model aided Inertial Navigation for AUV. Tesis doctoral. Vrije Universiteit Bruseel. Bruselas, Bélgica.
- Martínez, Y. (2012). Estrategias de control de profundidad para un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Santa Clara, Cuba.
- MathWorks (2013). *Desing Optimization Toolbox, Version 8, Release 1.0, 2013a*.
- Ramos, P.; Neves, M. V. (2008). *Underwater vehicles*. Chap. Environmental impact assessment and management of sewage outfall discharges using AUVs, pp. 417–436.

- InTech. Vienna, Austria.
- Repoulias, F; Papadopoulos, E. (2007). Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated auvs. *Ocean Engineering* **34**(11-12), 1650–1667.
- Robles, G. (2014). Diseño y estudio hidrodinámico de un submarino autónomo no tripulado: Auv. Trabajo de diploma. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Rodríguez, Y. (2011). Sistema remoto de supervisión y configuración de autopiloto de vehículo autónomo subacuático. Tesis de maestría. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Sangekar, M.; Chitre, M.; Koay T. B. (2008). Hardware architecture for a modular autonomous underwater vehicle *starfish*. In: *OCEANS*. IEEE Xplore. Quebec, Canadá. pp. 1–8.
- Shneydor, N. A. (1998). *Missile Guidance and Pursuit: Kinematics, Dynamics and Control*. Horwood Publishing. Filadelfia, Estados Unidos.
- Skejjic, R; Breivik, M.; Fossen T.I.; Faltinsen O.M. (2009). Modeling and control of underway replenishment operations in calm water. *Proceedings of the IFAC MCMC 09*.
- SNAME (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. Technical and research bulletin no. 1-5. SNAME. Nueva York, Estados Unidos.
- Valdés, D. (2010). Estado del arte en robótica submarina. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Valeriano-Medina, Y. (2013a). Modelado dinámico de un vehículo autónomo subacuático. Tesis de maestría. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Valeriano-Medina, Y.; Fernández, A.; Hernández L.; Prieto P. J. (2016). Yaw controller in sliding mode for underwater autonomous vehicle. *IEEE Latin American Transactions* **14**(3), 1213–1220.
- Valeriano-Medina, Y.; Hernández, A.; Hernández L. (2015). Controlador *ILOS* para el seguimiento de caminos en línea recta de un vehículo autónomo subacuático. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* **XXXVI**(2), 15–18.
- Valeriano-Medina, Y.; Martínez, A.; Hernández L.; Sahli H.; Rodríguez Y.; Cañizares J. R. (2013b). Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences* **19**(2), 175–200.
- Wernli, R. L. (2000). Auv commercialization-who's leading the pack?. In: *Proceedings of the OCEANS'00*. Vol. 1. Providence, Estados Unidos. pp. 390 – 395.
- Wilson, P. A.; Harris, C. J. (2003). A line of sight counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance. *The Journal OF Navigation* **56**(01), 111–121.

## ANEXO A

# CÓDIGOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE GUIADO

A continuación se describe los códigos de cada bloque presentados en la Figura 3-1:

**Bloque Generación del movimiento del objetivo:**

```
%function [posicion, ut] = fcn(t,uant,v)
%#codegen

%t define el tiempo de simulación
%v es la velocidad del objetivo

xant=uant(1); % posición en X y en Y del objetivo
                en el instante de tiempo anterior
yant=uant(2);
deltat=0.01; % período de muestreo
m=4;          %pendiente de la recta
xo=300; %posición inicial en X y en Y del objetivo
yo=300;

vx=v/sqrt(m^2+1) % velocidad del objetivo en cada eje
vy=(m*v)/sqrt(m^2+1)

y=vy*t+yo % posición del objetivo en X y en Y en función del tiempo
x=vx*t+xo

u=sqrt(vx^2+vy^2) % velocidad total del objetivo

posicion = [x y vx vy]; % posición y velocidad final
                en X y en Y del objetivo

ut=u;
```

**Bloque de guiado:** Este bloque contiene las funciones que calculan los valores del error de seguimiento transversal y longitudinal y el ángulo de rotación con respecto al sistema de referencia en tierra del objetivo. Además contiene el bloque de la ley de posición y del algoritmo de velocidad.

```
function [error,xt,p,s,alpha] = fcn(pts, x, y)
%#codegen

% p define la condición de parada de la simulación

xk=pts(1); %posición en X y en Y del objetivo
yk=pts(2);

vx=pts(3); %velocidad en X y en Y del objetivo
vy=pts(4);

alpha=atan2(vy,vx); % ángulo de inclinación del objetivo
                    con respecto al sistema de referencia fijo en tierra

st=(x-xk)*cos(alpha)+(y-yk)*sin(alpha);    %error de seguimiento longitudinal

et=-(x-xk)*sin(alpha)+(y-yk)*cos(alpha);    %error de seguimiento transversal

s=st;
p=0;
error = et;
xt = alpha;

Ley de posición:

function controlador = fcn(u)
%#codegen

kp=0.02;
error=u;
controlador=kp*error;

Algoritmo de velocidad:

function ud = fcn(s,ut)
```

```
%#codegen
```

```
ds=10; % parámetro de diseño del algoritmo
```

```
uamax=1; % velocidad de aproximación máxima del vehículo
```

```
ud = ut-uamax*(s/(sqrt(s^2+ds^2))); % velocidad deseada del vehículo
```