

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



TRABAJO DE DIPLOMA

Estrategia de control *MPC* para el seguimiento de caminos formados por líneas rectas para el *HRC - AUV*.

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Rolando Fleites Gutiérrez

Tutor: Ing. Anailys Hernández Julián
Msc. Yunier Valeriano Medina

Santa Clara

2017

“Año 59 de la Revolución”

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



TRABAJO DE DIPLOMA

Estrategia de control *MPC* para el seguimiento de caminos formados por líneas rectas para el *HRC - AUV*.

Tesis presentada en opción al grado de
Ingeniero en Automática

Autor: Rolando Fleites Gutiérrez
email: rfleites@uclv.cu

Tutor: Ing. Anailys Hernández Julián Prof. Instructor
Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV
email: anailyshj@uclv.cu

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

Santa Clara

2017

“Año 59 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.

Rolando Fleites Gutiérrez
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.

Rolando Fleites Gutiérrez
Autor

Fecha

Alain Martínez Laguardia, 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

“Muchos de los fracasos de la vida son de personas que no se dieron cuenta de lo cerca del éxito que estaban cuando se rindieron”.

Thomas A. Edison.

DEDICATORIA

A mi abuela,

A mi padre

A mis tutores

Al resto de mi familia y amigos

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a mi abuela y mi padre y al resto de mi familia.
A mis tutores Anailys y Valerio, por ser los mejores tutores de la UCLV y por haberse convertido en mis amigos.
A la gente del 108 de los camilitos: Addiel, Luisi, Julio, Sok, Luis Ernesto, Leosbel, Vicente y El papi. Estos fueron los mejores. A Claudia, América, Lisvet y Ketya. Gracias por ser todos excelentes amigos, en las buenas porque considero que no hubo malas.
A otros amigos como el Armando, el Gallego, Tyto, Danny, Taira, Camilo y Edgar, con los que pasé muy buenos momentos.

Santa Clara, Cuba, 2017

RESUMEN

Los vehículos autónomos subacuáticos han sido objeto de investigación en el mundo durante los últimos años. Para el cumplimiento de misiones sin intervención humana, donde los valores de referencias provienen del sistema de guiado, se hace imprescindible el correcto desempeño del sistema de control de dirección. En la presente investigación se diseña un controlador predictivo de dirección, que de conjunto con el algoritmo de guiado *I - LOS*, le permite al *HRC - AUV* el seguimiento de caminos en línea recta sin restricciones temporales. El controlador diseñado tiene en cuenta las restricciones de la señal de salida y las limitaciones físicas de los actuadores. El ajuste del controlador se realiza mediante la herramienta *MPCtool* de *Matlab*. El diseño es evaluado a partir de simulaciones, mostrando buen desempeño en presencia de perturbaciones marinas.

TABLA DE CONTENIDO

	<u>Página</u>
PENSAMIENTO	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
INTRODUCCIÓN	1
1. ESTUDIO SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL DE DIRECCIÓN EN VEHÍCULOS MARINOS	6
1.1. Introducción	6
1.2. Antecedentes, desarrollo y aplicaciones de los <i>AUV</i>	6
1.3. Descripción general del <i>HRC - AUV</i>	9
1.4. Sistema de Control de Movimiento	13
1.4.1. Sistema de navegación	13
1.4.2. Sistema de guiado	13
1.4.3. Sistema de control de dirección	15
1.5. Estrategias de control de dirección aplicadas en vehículos marinos .	16
1.6. Consideraciones finales.	18
2. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS DE <i>AUV</i>	20
2.1. Introducción	20
2.2. Modelo matemático	20
2.2.1. Sistema de coordenadas	20
2.2.2. Ecuaciones dinámicas de un vehículo autónomo subacuático .	22
2.2.3. Representaciones matemáticas de las perturbaciones marinas	23
2.3. Modelos lineales	25

2.3.1.	Subsistema lateral	26
2.4.	Estrategia <i>MPC</i>	27
2.4.1.	Selección del modelo de predicción	29
2.4.2.	Función de costo	33
2.4.3.	Restricciones	34
2.5.	Algoritmo de guiado <i>I - LOS</i>	34
2.6.	Consideraciones finales del capítulo	36
3.	AJUSTE Y EVALUACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL <i>MPC</i> PARA EL SEGUIMIENTO DE CAMINOS RECTOS	37
3.1.	Introducción	37
3.2.	Ajuste de los parámetros del controlador <i>MPC</i>	37
3.3.	Resultados de la simulación	39
3.3.1.	Simulación ante perturbaciones	40
3.4.	Evaluación de la estrategia <i>MPC</i> en conjunto con el controlador <i>I - LOS</i>	40
3.5.	Análisis económico y medioambiental	43
3.6.	Consideraciones finales del capítulo	44
	CONCLUSIONES	45
	RECOMENDACIONES	46
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
A.	MODELOS DINÁMICOS PARA EL <i>HRC - AUV</i>	54
A.1.	Modelo no lineal de 6 <i>GDL</i> para la simulación	54
A.2.	Modelo de 2 <i>GDL</i> para el subsistema lateral	55
B.	CÓDIGO PARA EL CÁLCULO DE LA DISTANCIA RECORRIDA POR EL VEHÍCULO <i>HRC - AUV</i>	56

INTRODUCCIÓN

El hombre a lo largo de la historia se ha visto atraído por los misterios de la naturaleza y su afán por descubrir lo desconocido ha hecho posible el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Esto ha permitido la implementación de sistemas de control en vehículos submarinos, rompiendo así muchos de los mitos que se les han atribuido a las profundidades oceánicas, debido principalmente al desconocimiento que se tiene de las mismas.

Los vehículos autónomos submarinos (*AUV*, *Autonomous Underwater Vehicle*) pertenecen a la familia de vehículos no tripulados (*UUV*, *Unmanned Underwater Vehicle*) y se definen como submarinos que portan consigo una fuente de energía y unidades de cómputo, donde se ejecutan softwares y soluciones de control que le permiten al vehículo cumplir misiones sin intervención humana (Sato, 2017; Fossen, 2011). De acuerdo a la manera en que son controlados los *AUV*, se clasifican en totalmente actuados y en sub-actuados. El término totalmente actuado se refiere al caso en que los actuadores del vehículo son capaces de generar fuerzas y momentos independientes para cada grado de libertad a controlar. En el caso del sub-actuado, es cuando los actuadores no generan todas las fuerzas y momentos que son necesarios para controlar de manera independiente cada grado de libertad.

Usualmente los *AUV* se programan para ejecutar variadas misiones subacuáticas y pueden ser lanzados y recuperados en zonas bajas de la costa o en mar abierto. Estas posibilidades hacen factible su uso en diferentes aplicaciones, entre las que se encuentran el monitoreo ambiental (Vasilijevic, 2017), la observación de fenómenos oceanográficos (Py, 2016), la exploración de recursos submarinos y las operaciones de búsqueda y rescate (Kumar, 2017).

Debido a las disímiles aplicaciones que poseen los *AUV*, se han desarrollado diferentes prototipos con fines investigativos por varias universidades del mundo, un ejemplo de ello son: la Universidad de Oporto en Portugal (de Sousa, 2015; Khoshrou, 2016), Universidad de Newcastle en Reino Unido (Weichao, 2015), Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (Ruud, 2016; Løvskar, 2017), Universidad de Islandia (Guls, 2016), entre otras.

Para la ejecución de misiones de manera autónoma en los *AUV*, se necesita contar con un esquema de control de movimiento (Fossen, 2011). El mismo está compuesto por tres subsistemas: sistema de navegación, sistema de guiado y sistema de control. El sistema de navegación provee la información relacionada con el objetivo propuesto y el vehículo en sí. A partir de esta información el sistema de guiado, utilizando alguna ley o algoritmo, genera las trayectorias de referencia que constituyen el valor deseado del sistema de control (Naeem, 2002; Lekkas, 2014).

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*), trabajan de manera conjunta en el desarrollo de un prototipo de *AUV*, el cual se ha dado a conocer con el nombre de *HRC - AUV* (Martínez, 2013). Este proyecto se desarrolla con fines científicos para su posterior aplicación en la exploración de ecosistemas marinos y el reconocimiento de las costas cubanas. Esta investigación tiene diferentes líneas de trabajo, entre las cuales destacan el desarrollo de los sistemas de navegación, control y guiado (García, 2014; Martínez, 2010; Valeriano, 2016; Valeriano-Medina, 2013b).

En cuanto al guiado, el *GARP* ha establecido el algoritmo *I - LOS* con el fin de lograr precisión durante misiones asociadas al escenario *path following*, donde el objetivo es el seguimiento de un camino sin restricciones temporales. Con esta estrategia se reducen los efectos provocados por las perturbaciones marinas durante la navegación (Hernández, 2014). En el caso del control de rumbo, se han desarrollado diferentes estrategias que van desde los controladores *PID* convencionales hasta otras de mayor complejidad (Valeriano, 2016). Sin embargo, hasta el momento solo han sido evaluados en pruebas experimentales los controladores *PID* (Valeriano-Medina, 2013b).

Dentro de las estrategias de control no convencionales se encuentra el control predictivo basado en modelo (*MPC*), el cual representa una metodología que se enmarca dentro de la ingeniería de control moderno y que desde sus inicios ha venido evolucionando como una herramienta capaz de mitigar mayormente los problemas que enfrenta la industria desde el enfoque de la teoría de control (Zambrano, 2013). Su éxito se debe principalmente a las posibilidades que brinda para el tratamiento de las restricciones en la señal de mando y en la salida controlada. Además, ofrece otras ventajas como la de introducir acciones de control anticipatorias de manera natural para compensar las perturbaciones medidas, así como la facilidad en cuanto a su implementación.

El diseño del controlador de dirección se hace muy difícil debido a que la dinámica de los *AUV* es altamente no lineal, con un elevado grado de incertidumbre en sus parámetros y las perturbaciones que los afectan son difíciles de estimar. A lo expresado

con anterioridad se le agrega las limitaciones físicas de los actuadores, implicando la necesidad de saturar la señal de mando del controlador. Todas estas dificultades se incrementan en el caso de un vehículo sub-actuado (Valeriano, 2016). En tal sentido, los controladores convencionales y varias de las metodologías de control no lineal no consideran las restricciones asociadas a los actuadores y las salidas durante el proceso de diseño.

De ahí que se define como **problema científico**: Atendiendo a las complejidades dinámicas que caracterizan a un vehículo subacuático, no se dispone de una estrategia de control de dirección para el vehículo sub-actuado *HRC - AUV*, que tenga en cuenta las limitaciones físicas de los actuadores, y que asegure el cumplimiento de las restricciones en las señales de salida durante el seguimiento de un camino recto sin restricciones temporales.

La hipótesis de la presente investigación es sustentada por los resultados de la revisión bibliográfica que se presenta en el Capítulo 1.

Hipótesis:

La utilización de un controlador predictivo basado en modelo para el control de dirección, en conjunto con la estrategia de guiado *I - LOS*, garantiza el seguimiento de un camino recto, a pesar de las limitaciones físicas de los actuadores, de las restricciones en las señales de salida, de la presencia de las corrientes marinas, así como de las incertidumbres y no linealidades del sistema.

Con esta investigación se pretenden cumplir los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Diseñar un controlador predictivo de dirección basado en modelo, que de conjunto con el algoritmo de guiado *I - LOS*, asegure el seguimiento de caminos sin restricciones temporales por parte del *HRC - AUV*.

Objetivos específicos:

1. Revisar los aspectos teóricos relacionados con la temática que aparecen reportados en la literatura.
2. Seleccionar el modelo dinámico del *HRC - AUV* para el diseño del control *MPC*.
3. Ajustar el controlador de dirección *MPC*.
4. Evaluar mediante simulación el desempeño del controlador *MPC* durante el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos expuestos anteriormente, se proponen las tareas siguientes:

- Revisión en la literatura especializada de los aspectos teóricos relacionados con la temática que aparecen reportados en la literatura.
- Estudio de la dinámica del vehículo *HRC - AUV*, así como de las perturbaciones que lo afectan.
- Determinación del modelo matemático a utilizar en el ajuste del controlador.
- Identificación de las limitaciones físicas de los actuadores del vehículo y de las restricciones de las salidas.
- Estudio de la estrategia de control *MPC*.
- Definición de los índices de desempeño para la sintonía del controlador.
- Ajuste del controlador *MPC*.
- Evaluación mediante simulación del ajuste realizado.
- Evaluación mediante simulación del desempeño del controlador *MPC* durante el seguimiento de caminos en línea recta.
- Elaboración del informe científico de la investigación.

Los resultados de la investigación poseen una aplicación práctica y teórica de gran trascendencia para los vehículos marinos que está desarrollando el *CIDNAV*. El controlador *MPC* podría ser evaluado en el *HRC - AUV* durante pruebas experimentales, con el fin de obtener la mejor solución de control posible para este vehículo. Este estudio sienta las bases para su continuidad a partir de la realización de tesis de maestría y doctorado en el Departamento de Automática.

Contenido de la Tesis:

Para el desarrollo de esta investigación se proponen 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: A partir de un estudio de la bibliografía especializada se presenta una descripción general del vehículo autónomo subacuático *HRC - AUV*. Se efectúa un análisis de las principales estrategias de control para vehículos marinos, así como de los aspectos relacionados con el controlador *MPC*.

Capítulo II: Se realiza una descripción del modelo del vehículo, las olas y las corrientes marinas, así como la identificación de las limitaciones físicas de los actuadores del vehículo y de las restricciones de las salidas. Se explica la estructura del controlador *MPC*, así como el procedimiento a seguir para la selección de los parámetros de ajuste. Se aborda la estrategia de guiado *I - LOS* que se utiliza en el vehículo.

Capítulo III: Se calculan los parámetros del controlador *MPC*. Se definen las condiciones a tener en cuenta para realizar el seguimiento de caminos rectos. Los resultados

obtenidos son analizados y evaluados mediante simulación. Además, se presenta el análisis económico de la investigación.

CAPÍTULO 1

ESTUDIO SOBRE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL DE DIRECCIÓN EN VEHÍCULOS MARINOS

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 control, 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 control que se reportan en la literatura especializada. Los trabajos anteriores realizados por *GARP* sobre el vehículo *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 submarinos pueden ser clasificados atendiendo a diversos criterios entre los que destaca si son tripulados o no. A su vez, entre los vehículos no tripulados, de acuerdo a la forma en que se realiza el control, se pueden encontrar los Vehículos Operados Remotamente (*ROV*, *Remotely Operated Vehicles*) y los *AUV* ([Rout, 2017a](#)). En los *ROV* el control es realizado por un operador que no está en el vehículo, y accede al mismo por señales de radio o mediante un cable por donde se realiza la transferencia de datos.

Por otra parte, los *AUV* poseen una arquitectura de control que les permite realizar misiones sin la supervisión de un operador. Además, portan consigo su propia fuente de energía (generalmente basada en baterías recargables). Por lo general no hay una vía de comunicación entre el vehículo y la superficie, ya que se le suele programar con tareas y misiones predefinidas. No obstante, cuando se requiere un intercambio de información con la superficie, la comunicación se puede realizar a través de dispositivos acústicos. Estos robots han superado las limitaciones impuestas por los cables de los *ROV* durante la realización de distintas tareas ([Moreno, 2014](#)).

Los *AUV* fueron desarrollados por primera vez en la década de 1960, impulsados por la demanda de la Marina de los Estados Unidos, debido a la necesidad de realizar operaciones de rescate y salvamento en aguas profundas. En los años 70, las universidades, los institutos y las organizaciones gubernamentales comenzaron la experimentación con este tipo de tecnología. Algunos de ellos tuvieron éxito, pero la mayoría no, aunque se lograron avances significativos (Wang, 2009).

Desde entonces, otros sectores han contribuido a elevar el potencial de tales dispositivos para todo tipo de tareas, siendo las industrias del petróleo y del gas las primeras en lograrlo. La década de 1980 representó una nueva era para estos vehículos ya que fueron capaces de operar a profundidades mayores de los límites de buceo comercial. Sin embargo, la caída de los precios del petróleo y una recesión global a mediados de esta década resultó en un período de estancamiento para el desarrollo de esta tecnología.

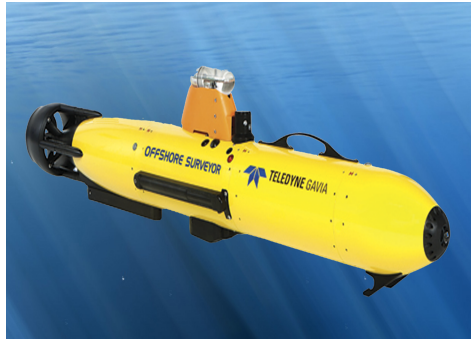
A inicios de los años 90, la comunidad científica retomó el interés en los *AUV* con fines académicos, por lo que muchas universidades del mundo se sumaron a la investigación en este campo, la cual fue seguida por el desarrollo de los primeros prototipos comerciales de *AUV* en el 2000 (Blidberg, 2001). Desde entonces, los *AUV* se están desarrollando cada vez más rápido.

El mercado mundial de vehículos submarinos autónomos estaba liderado por América del Norte con una participación de 63 % en 2014 (AUVAC, 2017). La mayor parte de las aplicaciones se encuentran concentradas en los sectores de la defensa y del comercio. A medida que esta tecnología sigue mejorando, aparecen nuevas aplicaciones en diferentes regiones geográficas donde raramente se usan robots submarinos autónomos en la actualidad.

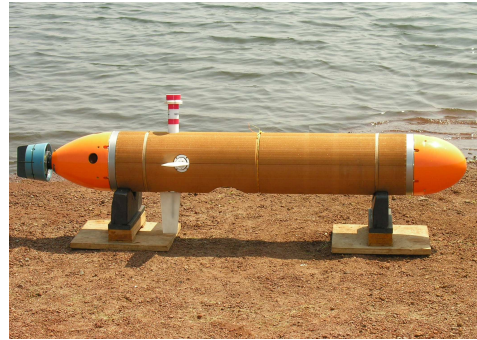
Algunos *AUV* pueden alcanzar profundidades de hasta 1000 m, de ahí que sean adecuados para aplicaciones tales como la oceanografía, investigación de hábitat, aplicaciones de búsqueda y operaciones de salvamento. Además, han sido adoptados ampliamente en el sector militar.

En la Figura 1–1 se muestran varios proyectos desarrollados con vehículos *AUV*, de los cuales a continuación se presenta una breve descripción:

***AUV Teledyne Gavia*:** comenzó en 1997 como un esfuerzo conjunto de desarrollo entre la Universidad de Islandia y *Hafmyndehf* (ahora Teledyne Gavia). Desde entonces, numerosos vehículos de Gavia han sido vendidos a usuarios militares, comerciales y científicos en Islandia, Australia, Dinamarca, Portugal, Reino Unido, Japón, Canadá y Estados Unidos (Guls, 2016).



(a) AUV Gavia



(b) AUV Maya



(c) AUV SeaCat

Figura 1–1: Proyectos de AUV.

Es una plataforma de estudio modular, portátil, capaz de proporcionar datos de alta calidad mientras opera desde buques o desde la costa. Constituye una herramienta ideal para investigadores que recolectan gran variedad de datos en profundidades de hasta 1000 m. Posee una longitud de aproximadamente 400 mm, con 295 mm de espacio útil y un diámetro interno de 178 mm. Debido a sus características, se usa en aplicaciones como la oceanografía, evaluación del hábitat, hidrografía, levantamientos batimétricos, arqueología, localización y cartografía de naufragios, clasificación de tipos de fondo, entre otras ([Albiez, 2015](#)).

AUV Maya: pertenece a una clase de pequeños vehículos submarinos autónomos utilizados fundamentalmente en áreas de aplicación marina, como oceanografía, monitoreo del medio ambiente costero, así como en aplicaciones navales como el mapeo de minas. El desarrollo del Maya fue financiado conjuntamente por el Instituto Nacional de Oceanografía y el Departamento de Electrónica y Tecnología de la Información, de Nueva Delhi en la India.

Posee una longitud total de aproximadamente 1,7 m, un diámetro de 0,234 m y pesa aproximadamente 54 kg en el aire, con el casco principal construido de una aleación de aluminio. Es impulsado por un único propulsor trasero situado en la sección posterior que también alberga un mástil para el *GPS* y las antenas de comunicación. Los sensores de navegación incluyen un Registro de Velocidad Doppler y una Unidad de Medición Inercial (*IMU*) ([Rout, 2017a](#)).

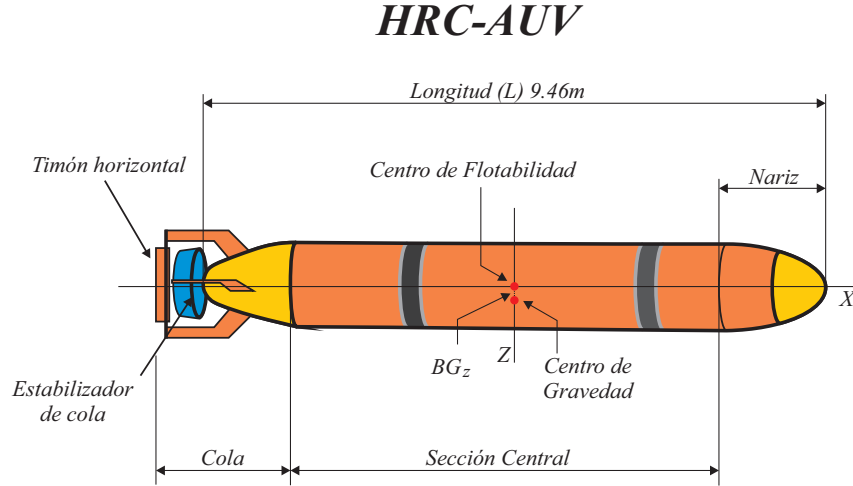
AUV *SeaCat*: es un vehículo de tamaño y peso moderado ([Chavez, 2016](#)). Su diseño es modular y escalable, puede ser adaptado a una gran variedad de misiones y aplicaciones. La modularidad se debe a que el vehículo consta de varias secciones con un propósito específico para cada una. Los materiales utilizados para los componentes del vehículo son no magnéticos, por ejemplo, aluminio, acero inoxidable y plásticos. Posee 576 mm de ancho y de altura 670 mm, pesa aproximadamente en el aire entre 130 y 180 kg. Puede operar hasta los 600 m de profundidad ([Luczynski, 2017](#); [AUVAC, 2017](#)).

1.3. Descripción general del *HRC - AUV*

El proyecto *HRC - AUV* es el primero que desarrolla la tecnología de los *AUV* en Cuba, el cual presenta como objetivos a alcanzar los siguientes ([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 *STARFISH* ([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, 2013](#)), tal y como se muestra en la Figura 1–2. Esta configuración hace que un mismo actuador se emplee para controlar varios movimientos, lo cual convierte a este vehículo en sub-actuado.

Figura 1-2: Diseño mecánico del vehículo *HRC - AUV*.

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, auto-piloto 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
BG	distancia entre el CG y el CF	[0, 0, 22 mm] ^T
δ_T	ángulo de deflexión del timón horizontal	$\pm 30^\circ$
δ_E	ángulo de deflexión del timón vertical	$\pm 30^\circ$

En la Figura 1-3 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.

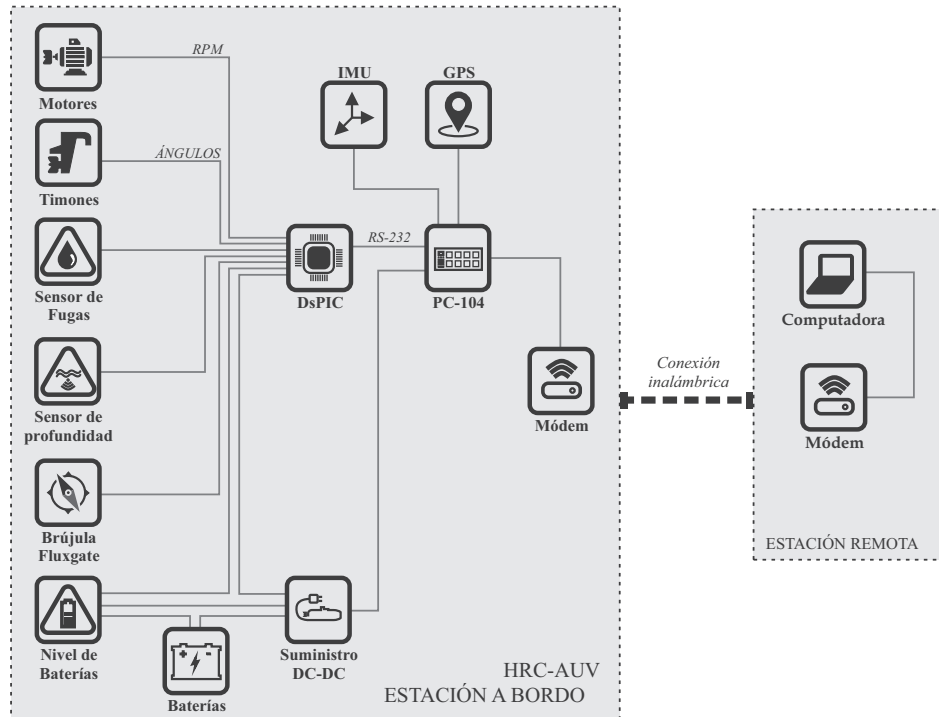


Figura 1-3: Arquitectura de hardware y sensorial instalada en el *HRC - AUV*.

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*[®]. 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*[®], 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*[®], 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, 2011a). 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*. Valeriano (Valeriano-Medina, 2013a) en su investigación determina un modelo no lineal de 6 grados de libertad (*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 para el vehículo. Para el sistema de control se han diseñado controladores *PID*, siendo evaluado el desempeño de los mismos en pruebas experimentales (Valeriano-Medina, 2013b). Otros tipos de controladores han sido diseñados para el *HRC - AUV* en investigaciones más recientes (Valeriano, 2016; López, 2013; Martínez, 2012; Juvier, 2013), con el propósito de obtener la mejor versión posible para el autopiloto del vehículo. Los resultados de estas propuestas han sido validados 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 (Garcia, 2014). Como resultado, se dispone de dos variantes de filtrado de las olas, tanto para el lazo de control de dirección como para el 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 obtenido resultados donde se han desarrollado variantes de la estrategia *LOS* (Costa, 2016; Miranda, 2016). En un primer momento Rodríguez (Rodríguez, 2011b) propone *LOS* con el fin de seguir puntos, y Valeriano (Valeriano-Medina, 2013b) evalúa dicha propuesta a partir de simulaciones y pruebas reales del vehículo en el mar. Luego, manteniendo la estrategia *LOS*, se

utiliza la distancia *lookahead* como ley de dirección para lograr el seguimiento de caminos en línea recta, a partir de la cual se calcula el ángulo de rumbo deseado (Zamora, 2011). A partir de los resultados obtenidos, Hernández (Hernández, 2014) le adiciona al controlador una acción integral (*I - LOS*) con el objetivo de reducir el efecto de las perturbaciones marinas durante el seguimiento de caminos rectos y Jorge (Fernández, 2015) la emplea para el seguimiento de caminos completamente curvos.

1.4. Sistema de Control de Movimiento

Como se había mencionado con anterioridad, para la ejecución de misiones de manera autónoma utilizando los AUV, se necesita contar con un esquema de control de movimiento (Fossen, 2011) como el que se muestra en la Figura 1-4. El sistema de control de movimiento está compuesto por tres subsistemas: sistema de navegación, sistema de guiado y sistema de control. Aunque cada uno de estos sistemas tiene una función específica, existe una estrecha relación entre ellos.

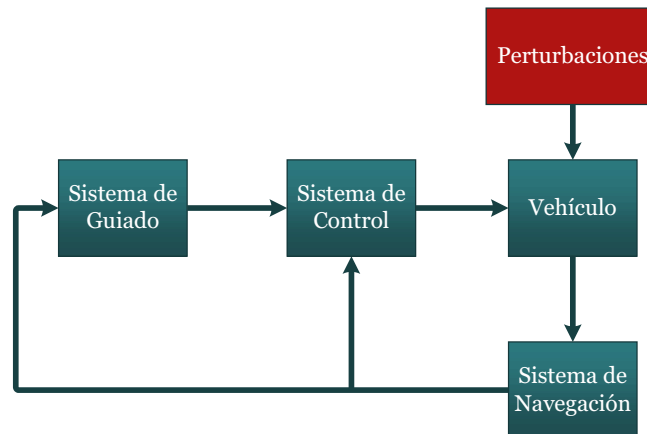


Figura 1-4: Esquema de control de movimiento.

1.4.1. Sistema de navegación

El sistema de navegación es el encargado de determinar la posición, profundidad y distancia recorrida por el vehículo, ya sea usando *GPS*, sensores como acelerómetros y giróscopos, o una combinación de ambos. En algunos casos, la velocidad y aceleración del movimiento son determinadas también. Los datos obtenidos por el sistema de navegación son fundamentales para el funcionamiento de los sistemas de guiado y control (Naeem, 2002; Lekkas, 2014; Sehuveret, 2016).

1.4.2. Sistema de guiado

El sistema de guiado representa una metodología básica relacionada con el comportamiento del movimiento transitorio asociado con el logro de objetivos de control de movimiento (Lekkas, 2014). Tiene como objetivo proporcionar de forma continua al controlador el estado de las referencias necesarias para que el vehículo siga la ruta de

manera precisa. Además, puede recibir información externa sobre el entorno, ya sea posición y rumbo de otros vehículos marinos, condiciones meteorológicas, datos geográficos, entre otros. Una función secundaria de este sistema es la de proporcionar señales de aviso de colisión o de proximidad a tierra (Cruz, 2012).

Cuando se habla de guiado es imprescindible mencionar los escenarios para el control de movimiento. Estos han sido redefinidos con el propósito de que los objetivos de control sean tareas del espacio de trabajo. De esta manera los vehículos sub-actuados están en condiciones de cumplimentar estas tareas (Breivik, 2008). Se definen como escenarios de control los siguientes:

Seguimiento de un objetivo en movimiento (*Target Tracking, TT*): El objetivo de control para este escenario consiste en seguir la posición de un objetivo que puede estar estacionario o moviéndose, del cual no está disponible información alguna sobre su movimiento futuro. Por tanto, resulta imposible tratar de manera independiente las restricciones temporales y espaciales asociadas al objetivo.

Seguimiento de un camino sin restricciones temporales (*Path following, PF*): El objetivo de control en este caso es converger y seguir un camino geométrico previamente definido, el cual sólo involucra restricciones espaciales. No se tienen en cuenta restricciones temporales en el recorrido a lo largo del camino, es decir, no se especifica cuándo el vehículo alcanzará alguno de los puntos que forman parte del camino.

Seguimiento de un objetivo a lo largo de una trayectoria (*Path Tracking, PT*): El objetivo de control para este escenario tiene que ver con el seguimiento de la posición de un objetivo que se mueve a lo largo de un camino predefinido. Por tanto, en este caso sí se conoce con anterioridad la información sobre el movimiento futuro del objetivo. Para este escenario resulta posible separar las restricciones espaciales y temporales asociadas a la posición del objetivo en dos restricciones independientes. En ese caso la prioridad es converger y seguir el camino, mientras que alcanzar al objetivo que se mueve por el camino queda en un segundo plano. En caso de que no se haga uso de la información disponible sobre el camino, este escenario de control se convertiría en *target tracking*.

Maniobrar a lo largo de un camino (*Path Maneuvering, PM*): El objetivo de control consiste en utilizar el conocimiento disponible sobre las limitaciones de maniobrabilidad del vehículo, para de algún modo viabilizar el seguimiento de un camino predefinido. Un ejemplo de maniobra sería lograr cumplir con el trayecto lo más rápido posible sin que el vehículo se desvíe del camino. En este caso las restricciones espaciales suelen tener prioridad sobre las restricciones de índole temporal.

Según el escenario que se adopte, se pueden concretar estrategias de guiado comunes para cada uno. Las estrategias de guiado más aplicadas en vehículos autónomos son (Breivik, 2007): Línea de Visión (*Line of Sight, LOS*), Persecución (*Pure Pursuit, PP*) y Dirección Constante (*Constant Bearing, CB*). Para aplicaciones relacionadas con el seguimiento de caminos sin restricciones temporales se utiliza mayoritariamente la estrategia *LOS*, la cual, como se muestra en la Figura 1-5, es un esquema de tres puntos (referencia, interceptor y objetivo), que alinea la velocidad del interceptor con un vector (vector *LOS*), cuya dirección se encuentra a lo largo de una línea recta que intercepta la línea de visión entre la referencia y el objetivo.

Si las corrientes oceánicas tienen un componente que actúa en la dirección normal a la trayectoria, un vehículo sub-actuado no puede seguir el camino sin error. La ley de guiado *I - LOS*, resultado de introducir una acción integral, permite contrarrestar el efecto de las perturbaciones marinas durante el seguimiento de la trayectoria.

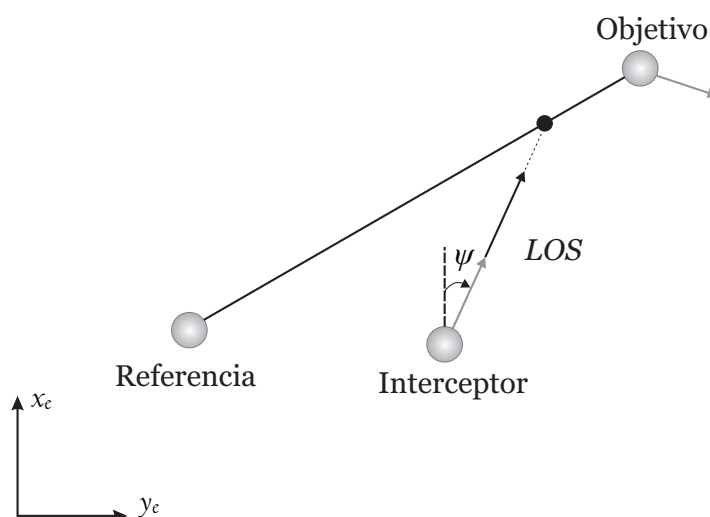


Figura 1-5: Esquema de guiado *LOS*.

1.4.3. Sistema de control de dirección

El controlador puede realizar distintas funciones o modos y, dependiendo del tipo de operación que vaya a realizar, puede seleccionar o combinar funciones. Entre los más utilizados están: control de velocidad, control de dirección, control de profundidad, controladores dinámicos de la posición, así como los estabilizadores de balanceo y cabeceo.

Los elementos normalmente usados para proporcionar las fuerzas y momentos de control son: la hélice o hélices, que se encargan de producir el empuje de avance del vehículo; una alternativa a las hélices son los motores de inyección de agua para impulsar el vehículo marino; el timón o timones para generar un movimiento de giro acimutal, y que son el principal elemento generador de fuerzas para el control de rumbo; impulsores laterales, situados en la parte inferior del casco y que producen fuerzas que son útiles

para maniobras a bajas velocidades; impulsores acimutales, situados también en la parte inferior del casco y que pueden rotar sobre el eje vertical a la superficie del vehículo marino (VM) para producir fuerzas en un plano horizontal; aletas estabilizadoras para amortiguar los movimientos de alabeo o de cabeceo; superficies de control para producir pares que amortigüen o produzcan giros (Cruz, 2012).

En el caso del controlador de dirección o de rumbo, la señal de mando genera un momento de guiñada con el propósito de seguir el valor deseado del ángulo de guiñada (ψ_d). Los elementos encargados de suministrar el momento de guiñada son los timones. Las funciones destinadas para el controlador de rumbo dependen de si interactúa o no con un algoritmo de guiado. Si las referencias provienen directamente de un operador, el controlador puede utilizarse para seguir un ángulo respecto a un sistema geográfico. Cuando los valores deseados de rumbo son calculados por un algoritmo de guiado, entonces las funciones del controlador serían conducir al vehículo a un punto determinado o seguir un camino.

En el modo ruta hay que diferenciar entre *path following*, en el que el VM debe converger a un camino sin una especificación temporal, y el *trajectory tracking*, en el que se requiere que el VM alcance y siga un camino parametrizado en el tiempo.

1.5. Estrategias de control de dirección aplicadas en vehículos marinos

Son muchas las estrategias de control cuyos diseños se basan tanto en modelos lineales como en no lineales, y que son utilizadas en el control de dirección de vehículos marinos.

La literatura especializada muestra ejemplos de ellas, como los controladores lineales cuadráticos (Bo, 2016; Isa, 2013) y los controladores convencionales tipo PID (Arshad, 2004; Rout, 2017b). Tal es el caso de la investigación realizada por (Banazadeh, 2013), donde a partir de un modelo expresado mediante una función de transferencia, que describe la dinámica de balanceo y guiñada de un vehículo marino acorde a la estructura de *Nomoto*, se diseña un controlador de dirección PID , en adición con un controlador anticipatorio, para lograr maniobras precisas de cambio de rumbo.

Utilizar un controlador de dirección tipo PID resulta conveniente en aquellos casos en que el vehículo subacuático *HRC - AUV* desarrolle misiones en las que un operador suministre los valores deseados de rumbo. El hecho de que su diseño se realice a partir de un modelo lineal, permite trabajar con un modelo menos complejo y más fácil de obtener. En los casos de misiones que implican el seguimiento de caminos, donde los valores de referencias provienen del sistema de guiado, resulta necesario evaluar otras técnicas de control que aseguren una convergencia estable al camino.

Entre las técnicas avanzadas empleadas para el control de dirección se pueden mencionar el control adaptativo, ya sea de manera independiente (Børhaug, 2008; Rout, 2017a) o combinado con otra estrategia (Chen, 2016), y el control en modo deslizante (Zhang, 2013; Song, 2015; Lakhekar, 2015). Además, a partir de modelos no lineales, se han desarrollado otras variantes de control como H_∞ (Veremey, 2012; Yang, 2015), *backstepping* (Xiao, 2014; Liu, 2017) y los basados en control inteligente tales como lógica difusa (Qi, 2016) y redes neuronales (Isa, 2013).

Un ejemplo de las estrategias mencionadas con anterioridad es el diseño del controlador de rumbo en modo deslizante para el *HRC - AUV* (Valeriano, 2016), el cual es evaluado mediante simulación, mostrando que la ley de control implementada asegura la estabilidad y robustez del sistema.

El control predictivo basado en modelo es otra técnica de control empleada en vehículos marinos que ha cobrado auge en los últimos años. Tal es el caso de (Yao, 2016), donde se emplea una variante de control predictivo generalizado (*GPC*) para el control en el plano vertical del vehículo *DOLPHIN MARK II AUV*, a partir de un modelo linealizado del mismo. Para el diseño del controlador se tienen en cuenta las restricciones en el ángulo de cabeceo (salida), en la razón de cambio del timón, así como la variación máxima y mínima que este puede tomar. En esta propuesta se logra el control del cabeceo y profundidad del vehículo, obteniendo buenos resultados en las simulaciones realizadas.

Wasif Naeem (Naeem, 2002) investiga la aplicación de la estrategia *MPC* para controlar el ángulo de guiñada de un *AUV*, utilizando el esquema de guiado *LOS* para calcular la referencia que debe seguir el vehículo. Esta propuesta fue validada mediante simulación, logrando demostrar la idoneidad del algoritmo propuesto, donde se muestra que el vehículo sigue correctamente el camino, cumpliendo de manera eficiente con las restricciones a las que fueron sujetas los actuadores.

Zhen Li (Li, 2009), resuelve el problema de seguimiento de camino sin restricciones temporales para un vehículo de superficie, usando la variante *MPC* basada en un modelo lineal. Para ello realiza un análisis del período de muestreo a seleccionar y se tienen en cuenta las restricciones en la razón de cambio del timón, así como la variación máxima y mínima que puede tomar. El ajuste realizado se evaluó mediante simulación utilizando un modelo no lineal de 4 *GDL*, mostrando buenos resultados.

Otros autores proponen una ley de control para que un vehículo sub-actuado siga un trayecto en línea recta usando *LOS* como ley de guiado (Pavlov, 2009). Dicho controlador actualiza el valor de la distancia *lookahead*, variable en el tiempo, permitiendo obtener el desempeño óptimo del sistema en lazo cerrado. Dicha propuesta fue evaluada mediante simulaciones, obteniendo como resultado la estabilidad asintótica global

del sistema en lazo cerrado, incluso en el caso en que el controlador *MPC* no pueda encontrar una solución al problema de optimización dentro de los límites de tiempo establecidos.

En otro trabajo (Oh, 2010), se realiza un diseño de un controlador *MPC* integrado con el algoritmo de guiado *LOS*, para lograr el seguimiento de camino sin restricciones temporales por parte de vehículos totalmente actuados. Se escoge esta estrategia de control por la necesidad de cumplir con las restricciones de saturación en el ángulo de deflexión del timón y su derivada.

Steenon (Steenon, 2014) propone el uso de la estrategia *MPC* para el control de velocidad y profundidad de un vehículo totalmente sobreactuado, donde la descripción de las dinámicas del sistema utilizadas incluyen términos medidos experimentalmente. Los resultados mostrados en este trabajo comprueban la efectividad del uso de esta estrategia en *AUV*, ya que se logra maniobrar el vehículo en presencia de limitaciones en los actuadores.

En (Yao, 2017), a partir de un observador no lineal de orden reducido, se estiman las variables de estado de un *AUV*. El control de la profundidad y cabeceo del vehículo en el plano vertical se realiza mediante una variante de la estrategia de control predictivo basado en un modelo no lineal, tomando en cuenta las restricciones en la señal de mando y la salida. Los autores plantean, a partir de los resultados obtenidos, que la estrategia *MPC* es una alternativa recomendable para vehículos sub-actuados, por la simplicidad en su diseño.

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se puede concretar que para el diseño del sistema de control de vehículos autónomos submarinos destaca la estrategia *MPC*, por ser empleada en el control de vehículos sub-actuados y por el buen tratamiento que brinda a las restricciones. Otras bondades de esta estrategia son:

- Minimización de funciones de costos
- Maximización del rendimiento
- Tiene en cuenta las limitaciones físicas de los actuadores
- Permite la operación cerca de las restricciones
- Evita el efecto “wind-up”
- Posee intrínsecamente compensación del retardo

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 sistema de control sigue siendo una temática compleja que continúa estudiándose.
- El control predictivo basado en modelo constituye una estrategia de control que tiene en cuenta las restricciones en la salida del sistema y las limitaciones físicas de los actuadores.
- Es posible determinar una ley de control de dirección basada en *MPC*, para el *HRC* - *AUV*, que en conjunto con la estrategia de guiado *I - LOS*, asegure un adecuado desempeño del vehículo durante el seguimiento de un camino recto sin restricciones temporales.

CAPÍTULO 2

CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELOS DE AUV

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. También se aborda la teoría asociada al control predictivo y se presenta el algoritmo de guiado *I - LOS*.

2.2. Modelo matemático

El modelado matemático de vehículos marinos incluye el estudio de la cinemática y la dinámica. Las características estáticas se refieren al estado de equilibrio de los cuerpos en reposo o cuando se mueven con velocidad constante, mientras que las dinámicas conciernen al comportamiento de los cuerpos con movimiento acelerado (Fossen, 1994). Las leyes de la física legadas por *Isaac Newton* constituyen el punto de partida para el modelado de este tipo de vehículo.

El movimiento de un *AUV*, si este es considerado como un cuerpo sólido y rígido, puede ser representado matemáticamente usando 6 *GDL*. Los grados de libertad son el conjunto de desplazamientos independientes y rotaciones que especifican completamente la posición y la orientación de la embarcación (Fossen, 2011).

2.2.1. Sistema de coordenadas

Para el análisis del movimiento de un submarino, resulta conveniente definir dos sistemas de coordenadas como se muestra en la Figura 2-1. El sistema de coordenada móvil es convenientemente fijado en el vehículo, cuyos ejes x_B , y_B y z_B coinciden con los ejes de inercia y se definen de la forma siguiente:

- 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 de coordenadas del submarino (OB) puede estar situado en su centro de gravedad (CG) o en su centro de flotabilidad (CB), aprovechando el plano principal de simetría. Para el caso del *HRC – AUV*, OB se hace coincidir con CB .

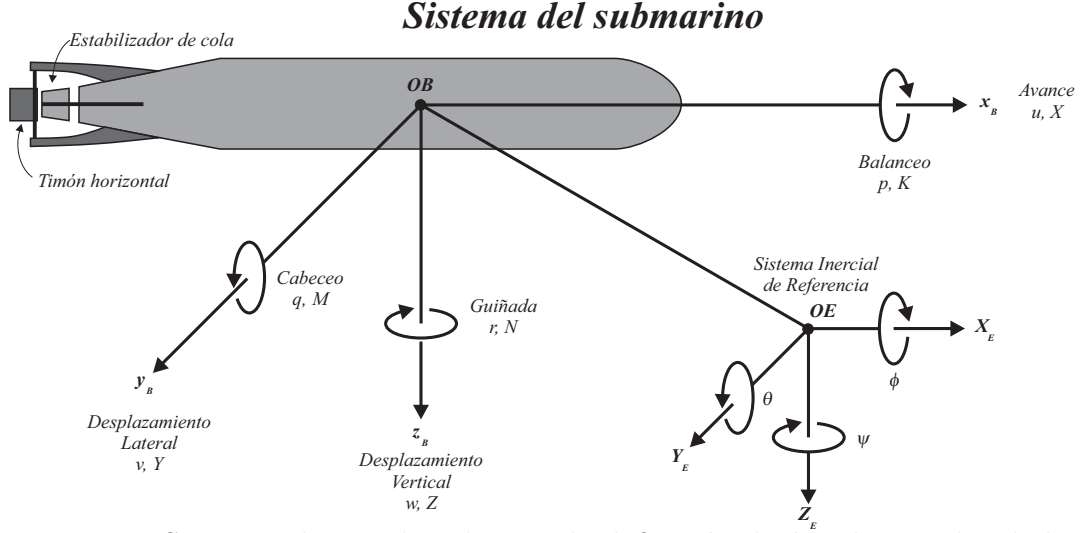


Figura 2–1: Sistemas de coordenadas con la definición de ángulos y velocidades.

Las aceleraciones a las que es sometido un punto sobre la superficie de la Tierra, producto al movimiento terrestre, son despreciables con respecto a las aceleraciones a las que es sometido un *AUV* de baja velocidad (Fossen, 1994). Esta consideración permite definir un sistema inercial 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 (Valeriano, 2016).

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	ϕ
Cabeceo	M	q	θ
Guiñada	N	r	ψ

El movimiento general de los vehículos marinos 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, $\boldsymbol{v}$ 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):

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

donde $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta})$ es la matriz de transformación del sistema coordinado ubicado en el vehículo al sistema inercial, y queda definida como:

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

siendo:

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

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):

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

donde M_{RB} designa a la matriz de masa del cuerpo rígido, $C_{RB}(\mathbf{v})$ 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:

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

donde $M = M_{RB} + M_A$ es la matriz de inercia incluyendo las masas añadidas, $C(\mathbf{v}) = C_{RB}(\mathbf{v}) + C_A(\mathbf{v})$ es una matriz que incluye los términos de *Coriolis* del cuerpo rígido y los de masas añadidas, $D(\mathbf{v})$ agrupa los términos de amortiguamiento, $g(\boldsymbol{\eta})$ 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.

La ecuación 2.6 constituye la representación vectorial del modelo dinámico no lineal de 6 *GDL* para un vehículo marino (Fossen, 2011). En el vehículo *HRC - AUV* la estructura de las matrices y vectores definidos anteriormente han sido determinados en investigaciones anteriores (Valeriano-Medina, 2013a). Debido a que dicho modelo será empleado para las simulaciones, los valores numéricos de las matrices que los describen se muestran en el Anexo A.1.

2.2.3. Representaciones matemáticas de las perturbaciones marinas

Las principales perturbaciones que afectan a los vehículos subacuáticos durante la navegación lo constituyen el oleaje generado por el viento y las corrientes marinas. A la ecuación 2.6 se le incorporan los términos relativos al oleaje y a las corrientes marinas quedando como sigue:

$$M\dot{\boldsymbol{\nu}}_r + C(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + D(\boldsymbol{\nu}_r)\boldsymbol{\nu}_r + g(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_{olas} + \boldsymbol{\tau} \quad (2.7)$$

donde $(\boldsymbol{\tau}_{olas})$ representa las fuerzas y momentos provocados por las olas mientras que $(\boldsymbol{\nu}_r)$ simboliza la velocidad relativa a las corrientes.

Incluir el efecto del oleaje y las corrientes marinas en el modelo general de 6 *GDL* contribuye a garantizar mejores resultados y mayor robustez de los sistemas de navegación y control del vehículo. En la literatura se reporta un método que permite modelar analíticamente estas perturbaciones con buena exactitud (Fossen, 1994).

Modelo de la olas

Las fuerzas y los momentos inducidos por el mar sobre una embarcación rígida están dados por el vector $\boldsymbol{\tau}_{olas} = [X_{olas}, Y_{olas}, N_{olas}]^T$ (Fossen, 1994).

El estado del mar se caracteriza mediante la función de un espectro. Los espectros de las olas son modelos que se utilizan para obtener aproximaciones lineales y funciones de transferencias útiles para realizar estudios de simulación y diseños de filtros para el oleaje. El espectro *JONSWAP* (*Joint North Sea Wave Project*) (Ochi, 1998), se emplea para representar las olas generadas por el viento en aquellas zonas marinas donde el área del mar es limitada y la profundidad se considera finita.

Desde el punto de vista de los sistemas automáticos, resulta conveniente contar con una aproximación lineal del espectro del oleaje que pueda ser incluida en los lazos de control, debido a su simplicidad y aplicabilidad. En este sentido es posible obtener una función de transferencia de segundo orden para representar los efectos del oleaje en cada uno de los grados de libertad. Por simplicidad, a continuación sólo se presenta la relacionada con un grado de libertad, pero la estructura es similar para el resto.

$$y(s) = \frac{K_\omega s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}. \quad (2.8)$$

La ganancia constante K_ω se define como:

$$K_\omega = 2\zeta\omega_0\varsigma_\omega, \quad (2.9)$$

siendo ς_ω una constante que describe la intensidad de las olas, ζ es el coeficiente de amortiguamiento, cuyo valor es de 0,1 para el espectro *JONSWAP* (Fossen, 2011), y ω_0 es la frecuencia fundamental de las olas definida anteriormente.

Ecuaciones para modelar las corrientes marinas

Las corrientes marinas se definen en el sistema de referencia inercial OE , las mismas se consideran constantes, irrotacionales y acotadas (Caharija, 2012). Para vehículos subacuáticos se definen mediante el vector $\mathbf{V}_c = [V_x, V_y, V_z]^T$, existiendo un valor constante V_{max} , tal que $V_{max} \geq \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$.

El efecto de las corrientes marinas se añade al modelo no lineal de 6 *GDL* del vehículo mediante el término $\boldsymbol{\nu}_r$ (velocidad relativa), ecuación (2.7). La velocidad relativa se define en el sistema de referencia OB :

$$\boldsymbol{\nu}_r = \boldsymbol{\nu} - \mathbf{V}_c, \quad (2.10)$$

siendo $\boldsymbol{\nu}$ el vector velocidad del vehículo definido en la ecuación 2.1, mientras que $\boldsymbol{\nu}_c = [u_c, v_c, w_c, 0, 0, 0]^T$ representa la velocidad de las corrientes marinas de un fluido irrotacional, donde u_c , v_c y w_c representan las componentes lineales de la velocidad de las corrientes.

El vector $\boldsymbol{\nu}_c$ se relaciona con $\mathbf{V}_c$ mediante la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{\nu}_c = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)^T \mathbf{V}_c, \quad (2.11)$$

donde $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ representa la matriz de traslación de OB a OE utilizando los ángulos de *Euler*.

Para esta investigación resulta de interés obtener un modelo bidimensional de las corrientes, por lo que la estructura del vector $\boldsymbol{\nu}_c$ sólo tiene en cuenta a las componentes (u_c, v_c) , considerando que $\alpha_c = 0$. De manera que las ecuaciones para determinar los términos de $\boldsymbol{\nu}_c$ quedan en función de V_{ca} y de β_c (ángulo de deslizamiento lateral) (Fossen, 2011):

$$\mathbf{V}_c = \begin{bmatrix} V_{ca} \cos(\beta_c) \\ V_{ca} \sin(\beta_c) \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Las componentes de velocidad de las corrientes referidas a OB se calculan mediante la ecuación (2.11):

$$u_c = V_{ca} \cos(\beta_c - \psi), \quad v_c = V_{ca} \sin(\beta_c - \psi), \quad (2.13)$$

con $V_{ca} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$.

El modelo para corrientes marinas constantes e irrotacionales constituye una buena aproximación cuando se implementa un sistema de control a bordo de la embarcación. La utilización de este tipo de modelo tiene implicaciones directas en la selección de objetivos de control adecuados, así como en el diseño de las estrategias de guiado y control.

2.3. Modelos lineales

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 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 ψ .

- Subsistema longitudinal, empleado para las maniobras de emersión-inmersión del vehículo. Variables de estado: q , θ y z .
- Subsistema de velocidad, utilizado para el diseño del controlador de velocidad. Variable de estado: u .

Como el diseño del controlador de rumbo es el objetivo de la presente investigación, resulta conveniente tener la representación matemática del subsistema lateral.

2.3.1. Subsistema lateral

La dinámica del vehículo para el subsistema lateral se puede describir a partir de las siguientes expresiones (Jalving, 1994):

$$\begin{aligned} Y &= m\dot{v} + mu_0r \\ N &= I_{zz}\dot{r} \end{aligned} \quad (2.14)$$

donde u_0 representa el valor de la velocidad crucero del vehículo.

La relación de transformación cinemática correspondiente al término ψ , teniendo como condiciones de operación para este subsistema que los ángulos de cabeceo y balanceo tendrán valores pequeños, queda de la siguiente manera:

$$\dot{\psi} = \frac{s\theta_0}{c\theta_0}q + \frac{c\phi_0}{c\theta_0}r \approx r \quad (2.15)$$

Las fuerzas Y y momentos N agrupan los términos relacionados con las masas añadidas, los coeficientes lineales de amortiguamiento y las ganancias del timón de cola del *HRC* - *AUV* en el subsistema lateral.

$$Y = Y_{\dot{v}}\dot{v}_r + Y_v v_r + \tau_Y$$

$$N = N_{\dot{r}}\dot{r} + N_r r + \tau_N$$

Los términos τ_Y y τ_N se obtienen como se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_2 \\ b_5 \end{bmatrix} \delta_T \quad (2.16)$$

Las expresiones anteriores se pueden escribir en forma de espacio de estado como:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_v}{m-Y_{\dot{v}}} & -\frac{mu_0}{m-Y_{\dot{v}}} & 0 \\ 0 & \frac{N_r}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_2}{m-Y_{\dot{v}}} \\ \frac{b_5}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (2.17)$$

La ecuación 2.17 constituye la representación dinámica en el espacio de estado del modelo lineal de 3 *GDL* del subsistema lateral, donde $Y_{\dot{v}}$ y $N_{\dot{r}}$ son la 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 la 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 y el ángulo del timón horizontal, la cual se conoce como modelo de *Nomoto* (Fossen, 2011) y está dada por la ecuación:

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{b_5}{(I_{zz} - N_{\dot{r}})s^2 - N_r s} \quad (2.18)$$

2.4. Estrategia *MPC*

La estrategia *MPC* tiene sus raíces en el control óptimo. Su concepto básico es usar el modelo dinámico de un sistema para pronosticar el comportamiento del mismo y optimizar dicho pronóstico para predecir la mejor decisión. En su forma más general acepta cualquier tipo de modelo, funciones objetivo o restricciones. Constituye la metodología que actualmente puede reflejar más directamente los múltiples criterios de funcionamiento relevantes en la industria de procesos (Rawlings, 2015).

El control predictivo fue desarrollado y usado por primera vez a finales de la década de 1960, sin llamar seriamente la atención de la comunidad académica del control, la cual tendió a ignorar el potencial de esta estrategia en el manejo de las restricciones, obviando así su principal ventaja. Al ignorar esta potencialidad, el control predictivo constituía el equivalente de un controlador convencional, por lo que no representaba una estrategia novedosa para aquel entonces (Macijowsky, 2002).

Las primeras aplicaciones industriales registradas de esta variante de control datan de principios de la década de 1970. Por varias razones, las industrias petroquímicas y de defensa fueron las primeras en mostrar interés y ofrecer apoyo económico para el desarrollo de esta técnica.

En la Figura 2-2 se representa la metodología básica de todos los controladores pertenecientes a la familia del *MPC*. A partir de su análisis se puede establecer la metodología que los caracteriza de la manera siguiente (Naeem, 2002; Camacho, 2004):

1. Uso explícito de un modelo para predecir las futuras salidas del proceso para un determinado horizonte N , llamado horizonte de predicción. Estas predicciones de la salida $(t + k|t)$ ¹ para $k = 1 \dots N$ dependen de los valores conocidos hasta el instante t (entradas y salidas conocidas) y de las señales de control $u(t + k|t)$, $k = 0 \dots N - 1$, que han de ser calculadas y enviadas al sistema.
2. El conjunto de señales de control futuras se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo mas próximo posible a la trayectoria de referencia $r(t + k)$ (que puede ser directamente el valor de consigna o una aproximación cercana a este). Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la salida predicha y la referencia también predicha, incluyendo en muchos casos el esfuerzo de control.
3. La señal de control $u(t|t)$ se aplica al proceso mientras que las demás variaciones calculadas son rechazadas. En el próximo instante se calcula $y(t + 1)$ a partir de la secuencia anterior y del valor actual. Se actualiza de nuevo el mando y se obtiene $u(t + 1|t + 1)$, valor que será diferente de $u(t + 1|t)$ (calculado en el instante anterior).

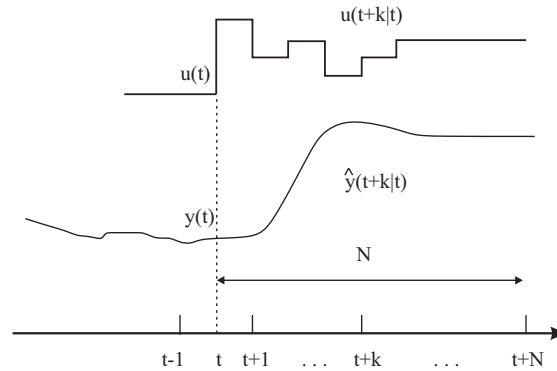
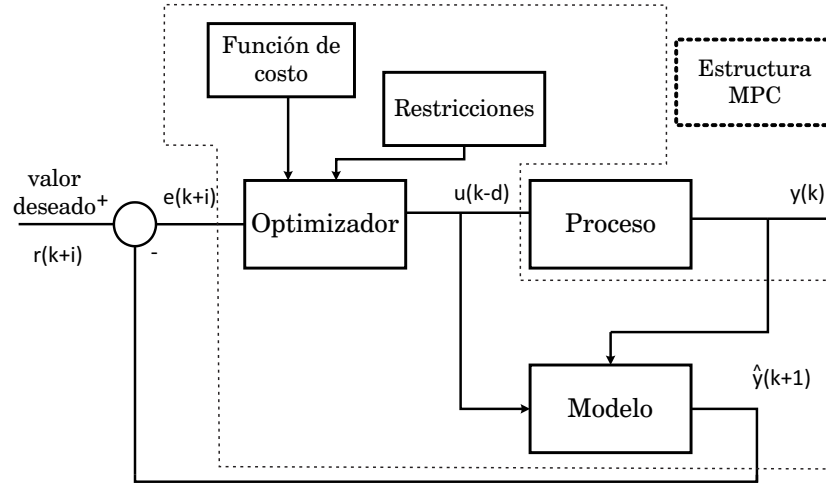


Figura 2-2: Estrategia del *MPC*.

Para llevar a cabo esta estrategia, se usa una esquema como el mostrado en la Figura 2-3. Se hace uso de un modelo para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las futuras señales de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de costo (donde aparece el futuro error), así como las restricciones. Por tanto, el modelo juega un papel decisivo en el controlador. El modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para poder predecir las salidas futuras, al mismo tiempo que debe ser sencillo de usar y de comprender (Camacho, 2004).

¹Esta notación indica el valor predicho de la variable en el instante $t + k$ que ha sido calculado en el instante t .

Figura 2-3: Estructura básica del *MPC*.

El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia pues proporciona las acciones de control. Si la función de costo es cuadrática, el mínimo se puede obtener como una función explícita de las entradas y salidas pasadas y de la referencia. Sin embargo, cuando existen restricciones de desigualdad, la solución debe ser calculada por métodos numéricos con más carga de cálculo.

2.4.1. Selección del modelo de predicción

En la práctica, la mayoría de los algoritmos *MPC* utilizan modelos lineales porque la dependencia de las predicciones sobre las opciones de control futuras es entonces lineal, facilitando así la optimización y el análisis “*off-line*” del comportamiento esperado del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, pueden utilizarse modelos no lineales donde la carga computacional implícita no sea un problema y las aproximaciones lineales no logren representar de manera precisa a la planta.

El uso del modelo del proceso viene determinado por la necesidad del cálculo de la salida predicha en instantes futuros $y(t + k|t)$, por lo que el modelo se considera apropiado si las predicciones resultantes del mismo son precisas. El esfuerzo y los detalles puestos en la etapa de modelado deberían reflejar esto. Puede que no sea necesario modelar toda la física, la química y el comportamiento interno del proceso para obtener un modelo que proporcione una predicción confiable y, de hecho, no se debe modelar todo este detalle si no es necesario.

Las diferentes estrategias de *MPC* pueden usar distintos modelos para representar la relación de las salidas con las entradas medibles, algunas de las cuales serán variables manipuladas y otras se pueden considerar como perturbaciones medibles. Casi todas las formas posibles de modelar un proceso aparecen en alguna formulación de *MPC*, siendo las más usadas las siguientes (Camacho, 2004; Richalet, 2009):

Respuesta al impulso

Este método se conoce también como secuencia de ponderación o modelo de convolución. La salida viene relacionada con la entrada por la ecuación:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i u(t-i) \quad (2.19)$$

donde h_i representa los valores muestreados que se obtienen de someter el proceso a un impulso unitario, de amplitud igual al período de muestreo, véase Figura 2-4. Esta suma es truncada y solo se consideran N valores (por tanto solo permite representar procesos estables y sin integradores), teniendo:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) = H(z^{-1})u(t) \quad (2.20)$$

donde $H(z^{-1}) = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_N z^{-N}$.

Este método es ampliamente aceptado en la práctica industrial debido a que es muy intuitivo y no requiere información previa sobre el proceso, con lo que el procedimiento de identificación se simplifica, a la vez que permite describir fácilmente dinámicas complejas como fase no mínima o retardos. Sin embargo, presenta como inconveniente el gran número de parámetros que necesita, ya que N suele ser un valor elevado (del orden de 40-50).

Como resultado, la predicción viene dada por:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t+k-i|t) = H(z^{-1})u(t+k|t) \quad (2.21)$$

Respuesta al paso

Un modelo de respuesta al paso está dado por una secuencia de valores que representan la respuesta al paso del proceso. Para sistemas estables se tiene la respuesta truncada que será:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t-i) = y_0 + G(z^{-1})(1-z^{-1})u(t) \quad (2.22)$$

En la ecuación 2.22, g_i agrupa los valores muestreados para una entrada escalón y $\Delta u(t) = u(t) - u(t - i)$, según se muestra en la Figura 2-4. El valor de y_0 puede tomarse 0, de ahí que el predictor sea:

$$\hat{y}(t + k|t) = \sum_{i=1}^N g_i \Delta u(t + k - i|t) \quad (2.23)$$

Este método presenta las mismas ventajas e inconvenientes que el anterior.

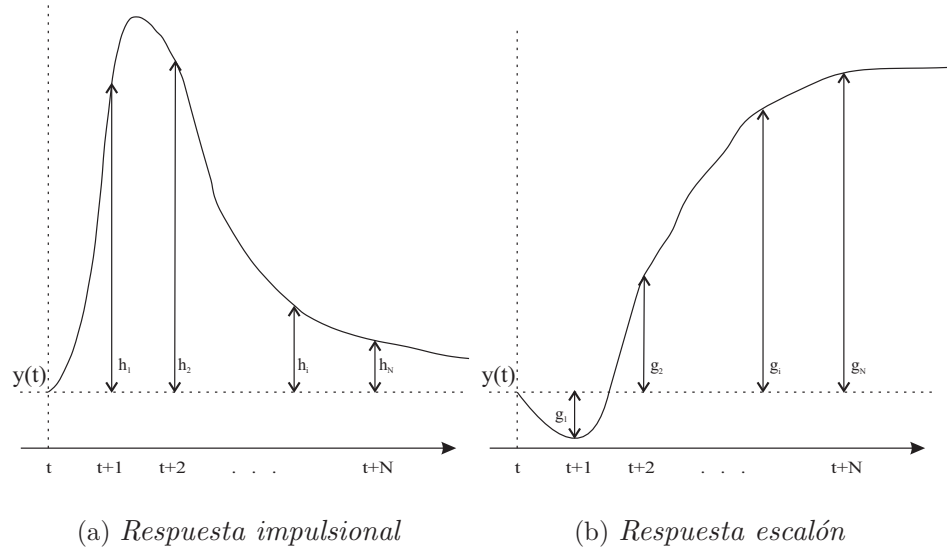


Figura 2-4: Respuesta impulsional y ante escalón.

Modelo de función de transferencia

Se utiliza el concepto de función de transferencia $G = \frac{B}{A}$ con lo que la salida viene dada por:

$$\begin{aligned} A(z^{-1})y(t) &= B(z^{-1})u(t) \\ A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n} \end{aligned}$$

Por tanto la predicción queda de la manera siguiente:

$$\hat{y}(t + k|t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t + k|t) \quad (2.24)$$

Esta representación es válida también para procesos inestables y posee la ventaja de necesitar pocos parámetros, aunque es fundamental un conocimiento del proceso, sobre todo en cuanto al orden de los polinomios A y B.

Modelo en el espacio de estado

Los modelos de espacio de estado o descripción interna se pueden usar también para formular el problema del control predictivo. Además, los principales resultados teóricos relacionados con la estabilidad provienen de este tipo de formulación, que puede ser usada tanto para problemas monovariantes como multivariantes y se puede extender fácilmente al caso no lineal. Se usan las siguientes ecuaciones para capturar la dinámica del proceso:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \mathbf{A}x(t-1) + \mathbf{B}u(t-1) \\ y(t) &= \mathbf{C}x(t) \end{aligned} \quad (2.25)$$

siendo x la variable de estado y $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ las matrices de entrada del sistema y $\mathbf{C}$ la matriz de salida. Para este modelo la predicción es:

$$\hat{y}(t+k|t) = \mathbf{C}\hat{x}(t+k|t) = \mathbf{C}[\mathbf{A}^k x(t) + \sum_{i=1}^k \mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}u(t+k-i|t)] \quad (2.26)$$

Este modelo posee la ventaja de que sirve también para sistemas multivariantes a la vez que permite analizar la estructura interna del proceso. Los cálculos pueden ser complicados, con la necesidad adicional de incluir un observador si los estados no son accesibles.

En la presente investigación se emplea la variante de modelo en espacio estado como modelo de predicción, debido a que se cuenta con el modelo en espacio de estado del subsistema lateral del vehículo, definido por la ecuación 2.17.

Según la literatura, existe una regla básica que propone usar el modelo más sencillo que describa el buen comportamiento del sistema para el diseño del controlador *MPC* (Ros-siter, 2003). Haciendo uso de lo anteriormente mencionado, y simplificando la ecuación 2.17 en función de los estados de interés para el control, se obtiene el modelo de 2 *GDL*, que representa la dinámica del subsistema lateral como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_r}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_5}{I_{zz}-N_{\dot{r}}} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T \quad (2.27)$$

Aunque el modelo obtenido es continuo, no se hace necesario su conversión a un modelo en el espacio de estados discreto, debido a que la herramienta de software para el ajuste del controlador *MPC* acepta modelos de este tipo.

2.4.2. Función de costo

Los diversos algoritmos de *MPC* proponen diferentes funciones de costo para la obtención de la ley de control. De manera general se persigue que la salida futura, en el horizonte considerado, siga una determinada señal de referencia al mismo tiempo que se pueda penalizar el esfuerzo de control requerido para hacerlo. La ecuación general de tal función objetivo se muestra a continuación:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} Q(j)[\hat{y}(t+j|t) - r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} R(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (2.28)$$

donde $\hat{y}$ es la salida estimada, r es la referencia y Δu es la variación del mando. En esta función los límites del horizonte de predicción están dados por N_1 y N_2 , mientras que N_u indica el horizonte de control. Además, Q y R son, respectivamente, secuencias de ponderación debido a los errores del proceso y al efecto del mando.

Para el caso de los coeficientes de $Q(j)$ y $R(j)$, se suelen usar valores constantes o secuencias exponenciales. Por ejemplo, se puede conseguir un peso exponencial de $Q(j)$ a lo largo del horizonte usando la ecuación 2.29.

$$Q(j) = \alpha^{N_2-j} \quad (2.29)$$

Para valores de $0 \leq \alpha \leq 1$ se penalizan más aquellos errores que se producen alejados del instante t que los que ocurren próximos a este, resultado de lo cual se obtiene un control más suave y con menor esfuerzo. Por otra parte, si $\alpha > 1$, se penalizan más los primeros errores que se producen, dando como resultado un control más brusco.

En la literatura consultada se han implementado otras funciones de costo, tal es el caso de (Naeem, 2002), donde se emplea la ecuación 2.30 para la obtención de la ley de control. Cabe resaltar la similitud con la función mostrada en la ecuación 2.28.

$$J = \sum_{j=1}^N e(k+j)^T Q e(k+j) + \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u(k+j)^T R \Delta u(k+j) \quad (2.30)$$

Los parámetros Q y R representan los pesos en la señal del error $e(k) = \hat{y}(k) - r(k)$ y la señal de mando respectivamente.

Para la presente investigación la función de costo seleccionada está dada por la ecuación 2.31. Dicha función de costo es la brindada por la herramienta *MPCtool* de *Matlab*.

$$J(k) = \sum_{i=0}^{N-1} \|y(k+i|k) - r(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_R^2 \quad (2.31)$$

2.4.3. Restricciones

El éxito de la estrategia de control predictivo radica principalmente en el manejo de las restricciones. Cuando se habla de este término, se debe tener en cuenta la diferencia que existe entre las restricciones en la entrada o el mando y las restricciones en la salida controlada. Las primeras representan limitaciones físicas del sistema, siendo impuestas por este en caso de que el controlador no sea capaz de respetarlas. Por otra parte, las restricciones en la salida o el mando son consideradas como deseables. En caso de que no pudieran ser alcanzables, debido a las perturbaciones que afecten el sistema, el controlador *MPC* se encarga de determinar en tiempo real el cumplimiento de las mismas de manera satisfactoria.

En el caso del *HRC - AUV*, el vehículo debe realizar el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales garantizando las restricciones en el ángulo de guiñada, véase ecuación 2.32, y teniendo en cuenta las limitaciones de los actuadores como se define en la ecuación 2.33.

$$-\psi_1 \leq \psi \leq \psi_2 \quad (2.32)$$

$$-\delta_{T1} \leq \delta_T \leq \delta_{T2} \quad (2.33)$$

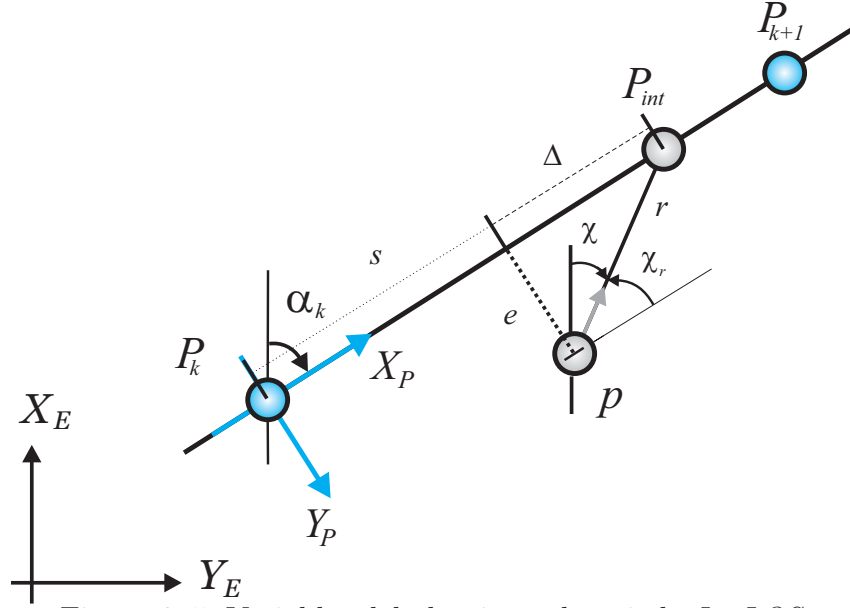
2.5. Algoritmo de guiado *I - LOS*

Los parámetros necesarios para calcular el ángulo de rumbo deseado son determinados a partir de la geometría del camino como se muestra en la Figura 2-5, donde $\alpha_k = \text{atan2}(y_{k+1} - y_k, x_{k+1} - x_k)$ es el ángulo de rotación del camino y $P_k = [y_k, x_k]^T \in \mathbb{R}^2$ y $P_{k+1} = [y_{k+1}, x_{k+1}]^T \in \mathbb{R}^2$ son los puntos a través de los cuales el vehículo debe pasar. Las ganancias del controlador son definidas tal que la ganancia proporcional es $k_p = \frac{1}{\Delta} > 0$ y $k_i > 0$ representa la ganancia integral.

El error de seguimiento perpendicular al camino se obtiene a partir de la ecuación 2.34.

$$e(t) = -(x_t - x_k) \text{sen} \alpha_k + (y_t - y_k) \text{cos} \alpha_k \quad (2.34)$$

Los objetivos de control en el seguimiento de caminos sin restricciones temporales, de acuerdo con las ecuaciones 2.35 y 2.36, consisten en lograr reducir a cero el error

Figura 2-5: Variables del algoritmo de guiado *I - LOS*.

de seguimiento perpendicular al camino, y calcular con precisión el ángulo de rumbo deseado que le permita al vehículo vencer los puntos del camino.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (2.35)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi(t) = \psi_d \quad (2.36)$$

En presencia de fuerzas externas, como son las corrientes marinas, se produce una diferencia entre la dirección hacia la cual el vehículo está mirando (orientación descrita por el ángulo de guiñada ψ) y la dirección hacia la cual se mueve el vehículo (orientación descrita por el ángulo de curso χ) (Lekkas, 2013). Esa diferencia se conoce como ángulo de deslizamiento lateral y se calcula como:

$$\beta_r = \text{atan2}(v_r, u_r) \quad (2.37)$$

En ese contexto, el ángulo de rumbo deseado debe ser entonces calculado como:

$$\psi_d = \chi - \beta_r \quad (2.38)$$

Existen dos alternativas que permiten compensar la influencia del ángulo de deslizamiento lateral. Una primera variante consiste en medir directamente este ángulo, lo cual depende fundamentalmente de la instrumentación disponible. En caso de no disponer

de sensores que aseguren exactitud en la medición de β_r , se puede utilizar una ley de guiado con acción integral. En ese caso se considera al ángulo de deslizamiento lateral como una perturbación pequeña, de poca variación, tal que $\beta_r \approx 0$, y se modifica el algoritmo de guiado basado en la distancia *lookahead* (Δ) introduciéndole una acción integral, quedando expresado de la siguiente manera:

$$\psi_d = \alpha_k - \arctan(k_p e(t) + k_i y_{int}) \quad (2.39)$$

donde $k_i = k k_p$, siendo k un parámetro de diseño y $\dot{y}_{int}$ queda definida como:

$$\dot{y}_{int} = \frac{e\Delta}{\Delta^2 + (e + k y_{int})^2} \quad (2.40)$$

De esta manera el algoritmo *I - LOS* calcula las referencias del ángulo de rumbo que debe ser seguidas por el controlador predictivo de dirección que se propone en esta investigación.

La idea de utilizar una acción integral en el algoritmo de guiado basado en la distancia *lookahead* se propone por (Breivik, 2008). Integrar el error de seguimiento perpendicular al camino permite que el ángulo de corrección no se anule cuando $e(t) = 0$. Una vez que el vehículo se encuentre sobre la ruta deseada, el ángulo de corrección en estado estable (χ_{rss}) tendrá el valor necesario para evitar una nueva desviación (Børhaug, 2008).

2.6. Consideraciones finales del capítulo

- La formulación del control predictivo se centra en identificar el modelo del proceso, seleccionar la función objetivo a minimizar y determinar las restricciones del sistema.
- Una simplificación lineal del modelo de 6 *GDL* del *HRC - AUV*, para el caso de su subsistema lateral, constituye una representación matemática eficaz para ser utilizada en la síntesis del controlador predictivo de dirección.
- El algoritmo de guiado *I - LOS* es el encargado de determinar los valores deseados de ángulo de guiñada que deben ser seguidos por el controlador *MPC*. La estructura matemática del *I - LOS* permite reducir los errores que provocan las corrientes marinas durante el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales.
- La existencia del modelo no lineal de 6 *GDL* del *HRC - AUV*, y la inclusión de perturbaciones como el oleaje y las corrientes marinas, permite la evaluación del desempeño del controlador de dirección predictivo durante el seguimiento de caminos en línea recta.

CAPÍTULO 3

AJUSTE Y EVALUACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL *MPC* PARA EL SEGUIMIENTO DE CAMINOS RECTOS

3.1. Introducción

La presente investigación se realiza con el propósito de diseñar una estrategia de control para el *HRC - AUV*, que permita el correcto desempeño del mismo, durante el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales. A partir del ajuste del controlador de rumbo, se comprueba su correcto desempeño antes de acoplarlo con el sistema de guiado. Una vez acoplados, la señal de referencia para el controlador de dirección es el valor deseado de rumbo (ψ_d), que se calcula por parte del algoritmo de guiado.

3.2. Ajuste de los parámetros del controlador *MPC*

Un modelo no lineal suele ser la representación más aproximada para un determinado sistema físico. Sin embargo, se usan fundamentalmente en la simulación y no en el diseño de los reguladores debido a la complejidad que supone para el ajuste las no linealidades que presentan. Es por esto que constituye una práctica muy recomendada obtener una representación linealizada alrededor de un punto de operación para luego emplearla en el proceso de ajuste de los controladores. El modelo usado para la sintonía del controlador *MPC* es el mostrado en el Capítulo 2, y está descrito por la ecuación 2.27, que se representa con valores numéricos en el Anexo A.2.

El controlador es diseñado utilizando la herramienta de control predictivo (*MPCtool*) del software *Matlab*. Como requisitos para el ajuste se persigue una respuesta con un máximo sobreimpulso entre 5 % – 25 % y un tiempo de establecimiento acorde a la dinámica lenta del submarino entre 25 y 45 s.

Para lograr el comportamiento deseado del sistema se ajustan los parámetros del controlador como se muestra en la Tabla 3-1.

El período de muestreo, seleccionado en investigaciones anteriores (Rodríguez, 2011b; Martínez, 2013, 2015), es $T=0,01$ s. El valor del horizonte de predicción seleccionado

Tabla 3–1: Parámetros de ajuste del controlador *MPC*

Parámetros	Descripción	Valor
T	período de muestreo	0,01 s
N	horizonte de predicción	120
N_u	horizonte de control	15
R	peso sobre la variable manipulada	1,7804
Q	peso sobre el error	89,0216

es alto, con el fin de obtener un rendimiento comparable al de la estimación completa de la información (Rawlings, 2015). Tomando como punto de partida este criterio, se analizó la respuesta del sistema para diferentes valores de N , tal y como se muestra en la Figura 3–1. A partir de ello se puede concluir que para el caso de esta investigación, un valor elevado del horizonte de predicción ($N = 120$) garantiza que la respuesta transitoria del sistema disminuya su tiempo de establecimiento y su máximo sobreimpulso.

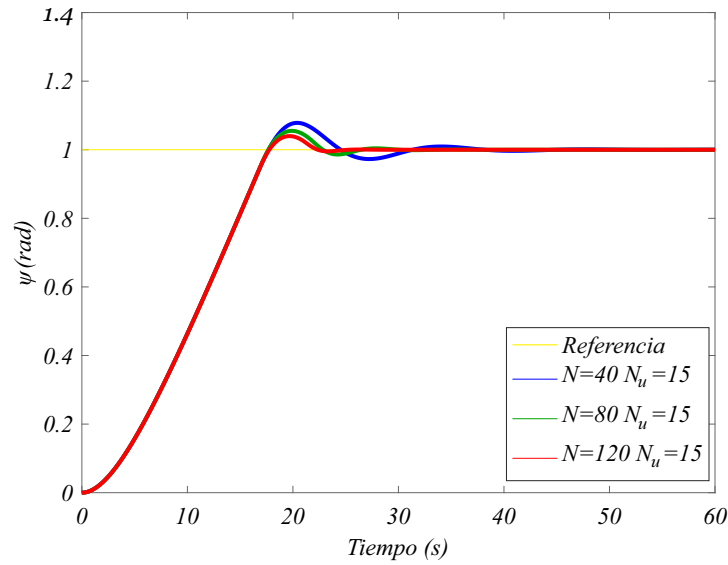


Figura 3–1: Respuesta temporal del ángulo de rumbo obtenida con el controlador *MPC* para diferentes horizontes de predicción.

El horizonte de control se seleccionó siguiendo el criterio $5 \leq N_u \leq 20$. Un valor de este parámetro fuera del rango mencionado hace más agresiva la señal de control, además de incrementar el esfuerzo computacional (Seborg, 2010). Las matrices Q y R se ajustaron con el fin de que se cumplieran de manera satisfactoria los requisitos establecidos para la respuesta transitoria del sistema. La señal de salida se encuentra restringida según la ecuación 3.1 debido a las características de diseño del controlador *I - LOS* (Breivik, 2008) y el cálculo del ángulo de rotación del camino. Por otra parte, debido a las

limitaciones físicas que presentan los actuadores, la señal de mando queda restringida como se muestra en la ecuación 3.2.

$$-\pi \leq \psi \leq \pi \quad (rad) \quad (3.1)$$

$$-\frac{\pi}{6} \leq \delta_T \leq \frac{\pi}{6} \quad (rad) \quad (3.2)$$

3.3. Resultados de la simulación

Para analizar el comportamiento del sistema con el controlador de dirección diseñado, se propone el esquema mostrado en la Figura 3-2. Es necesario aclarar que la señal de referencia no proviene del sistema de guiado, en este caso se aplica un paso de amplitud 1 rad en dicha entrada para evaluar el desempeño del controlador.

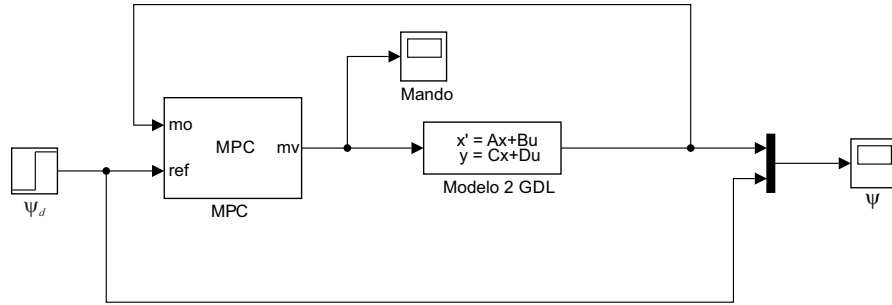


Figura 3-2: Esquema de simulación.

Empleando el esquema de la Figura 3-2, se obtiene la respuesta correspondiente al ángulo de rumbo (ψ) ante cambio paso en la señal de referencia.

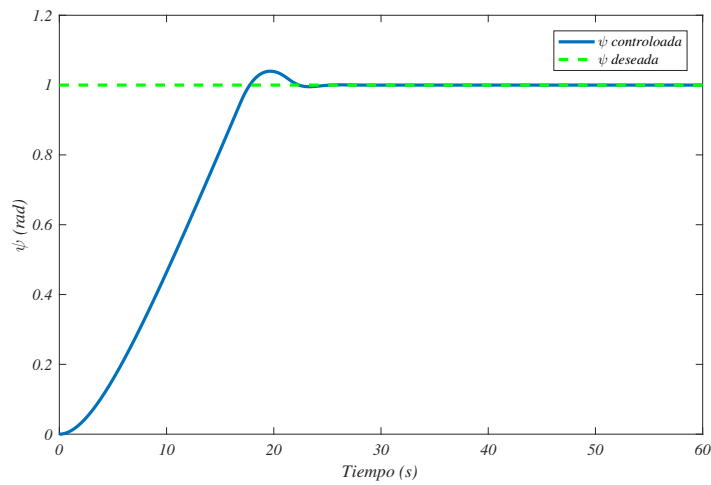


Figura 3-3: Respuesta temporal del ángulo de rumbo obtenida con el controlador MPC.

Como se puede apreciar, la respuesta obtenida presenta un comportamiento subamortiguado, con un máximo sobreimpulso (Mp) de 5 % y un tiempo de establecimiento (tss) de 26 s, que satisfacen los requisitos previstos para el diseño. La señal de mando, mostrada en la Figura 3-4, cumple con las restricciones impuestas por la ecuación 3.2.

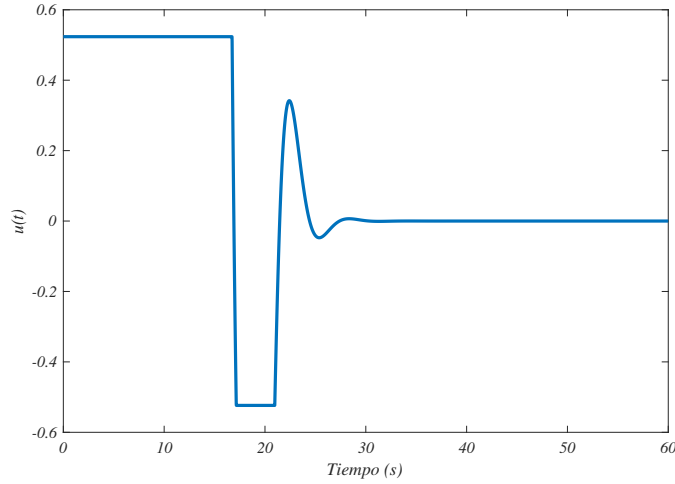


Figura 3-4: Señal de mando.

3.3.1. Simulación ante perturbaciones

Entre las bondades que ofrece la estrategia *MPC* destaca la de introducir acciones de control anticipatorias de manera natural para compensar las perturbaciones. Manteniendo un cambio paso unitario en la señal de referencia, pasados 30 s de simulación, al sistema se le aplica un cambio de magnitud de 0,0873 rad por la entrada perturbadora. El sistema de control es capaz de seguir la referencia deseada, aún en presencia de la perturbación, tal y como se muestra en la Figura 3-5.

La señal de mando correspondiente se presenta en la Figura 3-6.

3.4. Evaluación de la estrategia *MPC* en conjunto con el controlador *I - LOS*

El sistema de guiado debe generar un camino que el *AUV* pueda seguir, teniendo en cuenta las restricciones del vehículo, la morfología del ambiente y las restricciones espaciales y temporales requeridas para la misión. Luego, en base a este camino y los datos obtenidos por el sistema de navegación, calcula la referencia que utiliza el sistema de control, el cual manipula los actuadores para posicionar la embarcación en las coordenadas deseadas.

El vehículo cuenta con un motor de 24 V de alimentación, el cual gira a una velocidad de 500 rpm. Para la simulación se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones: la velocidad de las corrientes marinas $V_{ca} = 0,1$ m/s y su ángulo de dirección $\beta_c = 45^\circ$,

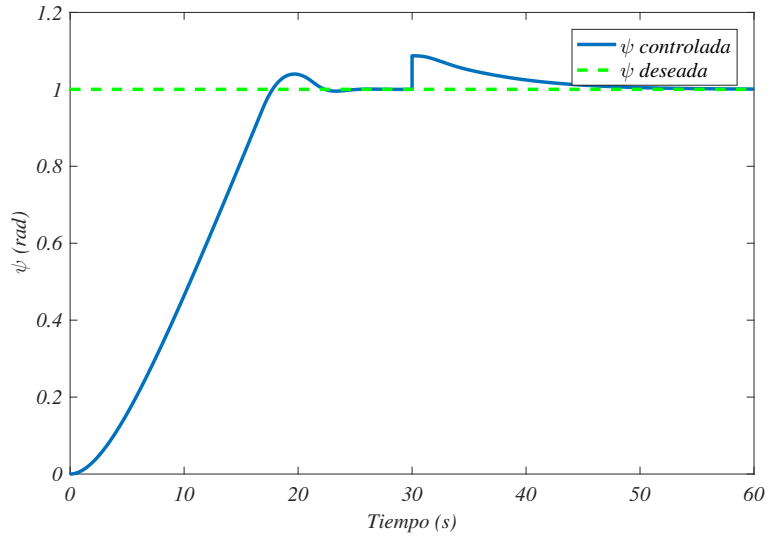


Figura 3-5: Respuesta temporal del ángulo de rumbo obtenida con el controlador *MPC* ante cambios en la entrada perturbadora.

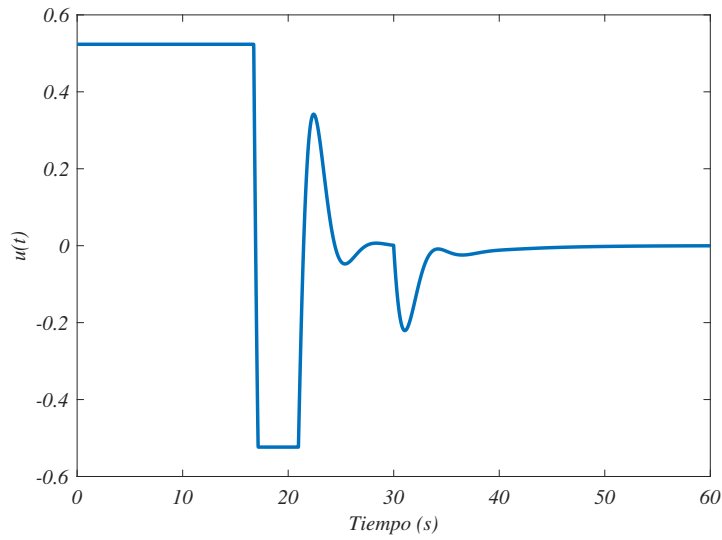


Figura 3-6: Señal de mando con cambio en entrada perturbadora.

la frecuencia fundamental de las olas $w_0 = 6 \text{ rad/s}$, con $\varsigma_w = 0,5 \text{ m}$, considerando un período de muestreo $T=0,01 \text{ s}$. La trayectoria es descrita por los puntos que se presentan en la Tabla 3-2, abarcando un recorrido de aproximadamente 3 km (este valor se obtuvo con el código mostrado en el Anexo B).

Tabla 3-2: Puntos de la trayectoria del experimento.

x (m)	0	215	921	120	-546
y (m)	0	646	520	-55	-294

En la Figura 3-7 se presentan los resultados obtenidos al graficar la trayectoria deseada y la que sigue el sistema con la estrategia de guiado *I - LOS* en conjunto con el controlador

MPC. Los valores del controlador *I - LOS* son $k_p = 0,025$ ($\Delta = 40$ m) y $k = 0,1$, mientras que los del controlador *MPC* son los mostrados en la Tabla 3-1. En las simulaciones se utiliza el modelo de 6 *GDL* del vehículo. Se corrobora que con el diseño realizado se sigue de forma adecuada la trayectoria deseada para el vehículo.

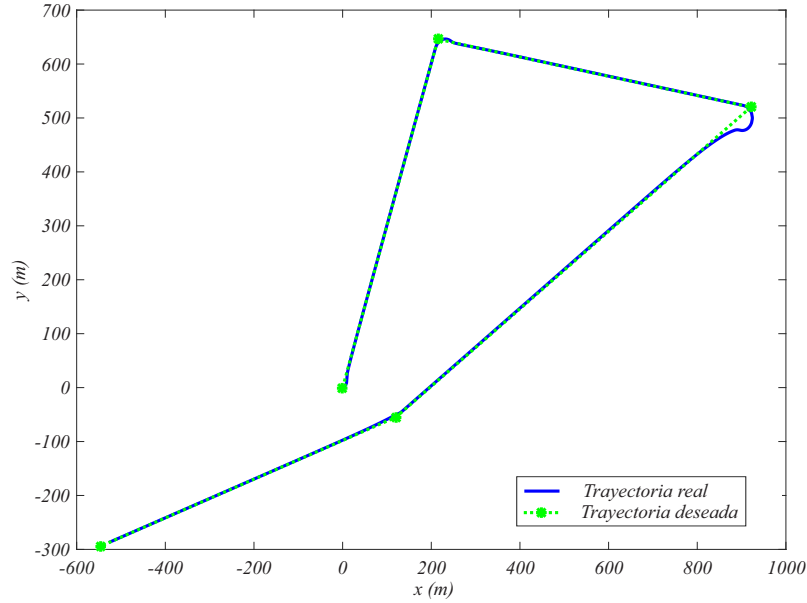


Figura 3-7: Seguimiento de camino.

El controlador *MPC* logra seguir los valores de referencia generados por el algoritmo de guiado *I - LOS*. Además, se cumplen las restricciones establecidas para la señal de rumbo. Ambas cuestiones quedan evidenciadas en la Figura 3-8.

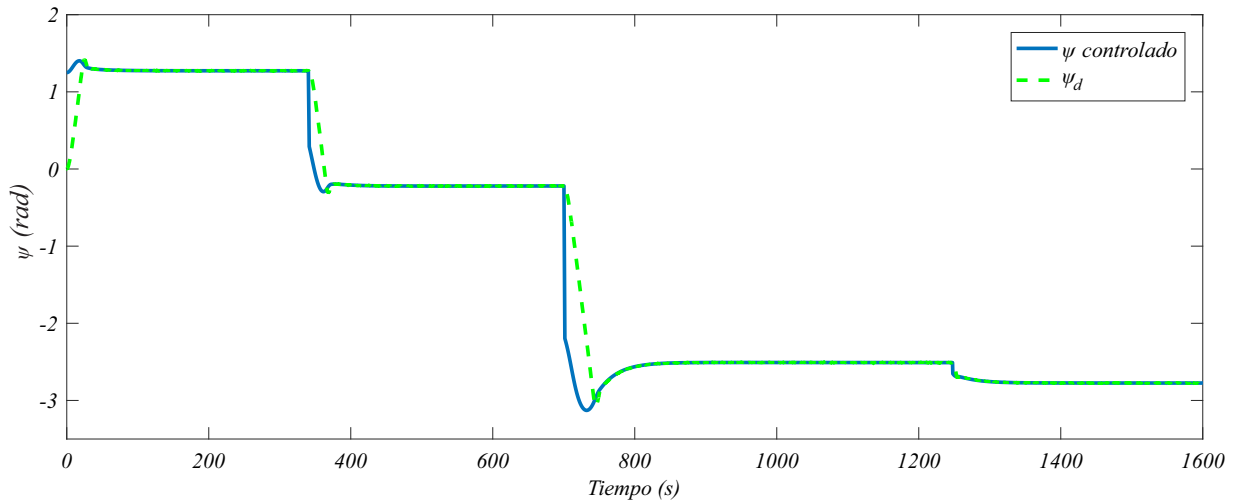


Figura 3-8: Ángulo de guiñada.

Como se observa en la Figura 3-9, el comportamiento del error perpendicular al camino durante el seguimiento de la trayectoria tiende a cero, a pesar de la influencia de las corrientes marinas. Esto se debe a la acción integral presente en el guiado que anula el efecto de las corrientes y asegura precisión durante el seguimiento del camino previsto.

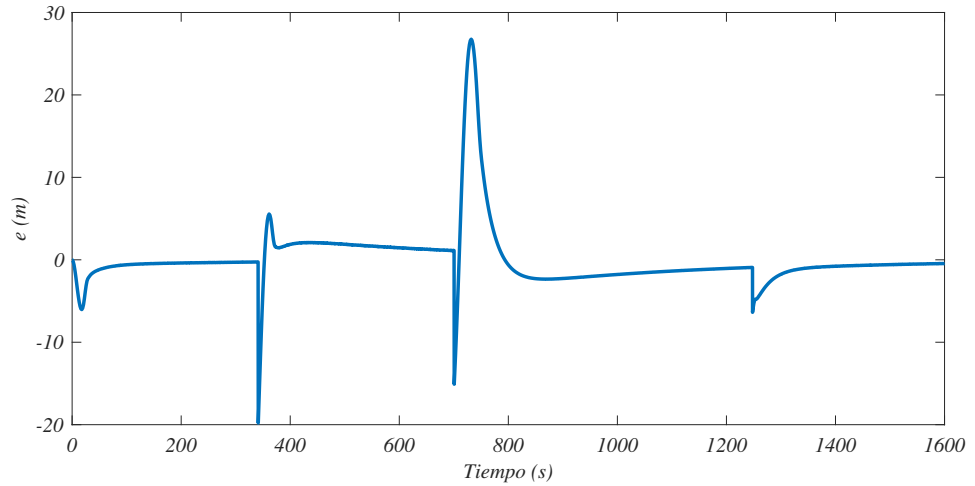


Figura 3-9: Error de seguimiento perpendicular al camino de la trayectoria del experimento.

La necesidad de tener en cuenta las limitaciones físicas de los actuadores ha sido uno de los criterios empleados para la selección de la estrategia de control de dirección de la presente investigación. La señal de mando presentada en la Figura 3-10 muestra que se cumplen las restricciones planteadas en la ecuación 3.2, ratificando la importancia de emplear un controlador predictivo.

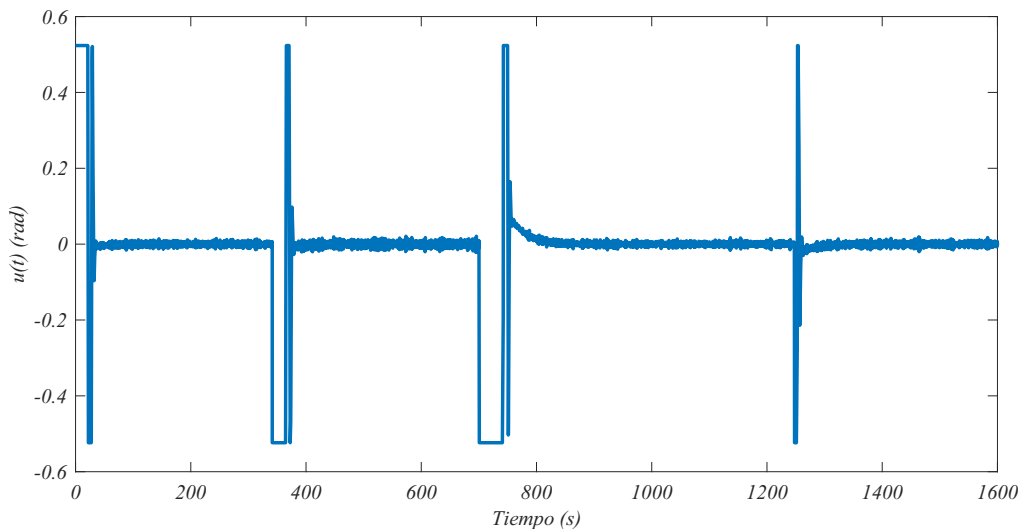


Figura 3-10: Señal de mando del controlador durante el seguimiento de la trayectoria planificada.

3.5. Análisis económico y medioambiental

La necesidad de conocer las profundidades oceánicas ha hecho de los *AUV* un campo de investigación de gran interés. El *HRC - AUV* es un proyecto que constituye la primera investigación de este tipo en el país. El costo típico de un *AUV* en el mundo oscila entre

1.5 y 2 millones de dólares americanos (*USD*), en dependencia de las características del equipamiento que tenga instalado.

En Cuba no se cuenta con grupos de especialistas en robótica que se dediquen a realizar el análisis y la optimización de estos sistemas. Sin embargo, basados en la experiencia con la que cuenta la industria cubana de personal extranjero calificado que se dedique a brindar servicios de análisis, mantenimiento o capacitación, estos cobran entre 35 y 50 dólares la hora. En aproximadamente 3 meses de realización de un proyecto como este, trabajando 12 semanas, a 6 horas diarias por 5 días hábiles a la semana, serían 18 000 dólares aproximadamente, por costo de mano de obra calificada. La propuesta que se realiza en esta investigación no requiere de esa inversión.

Los actuadores del vehículo son del tipo *Xlar TLM30*, valorados en 4000 *USD*. Uno de los principales méritos de la presente investigación está dado por la imposición de restricciones en la señal de mando que tengan en cuenta las limitaciones físicas de los actuadores. De ahí que no se necesita un saturador, y se contribuya al cuidado y desempeño que se traduce en el aumento de su vida útil.

Debido a que el vehículo *HRC - AUV* puede realizar misiones de manera autónoma, con la realización de este proyecto se puede contribuir al estudio y cuidado de los ecosistemas marinos, así como a la preservación de las especies que habitan las costas cubanas.

3.6. Consideraciones finales del capítulo

- El ajuste del controlador *MPC* se obtiene utilizando la herramienta *MPCtool* de *Matlab 2013*, definiendo los requisitos de respuesta transitoria en dependencia de las características del vehículo y teniendo en cuenta las restricciones establecidas.
- La propuesta de implementación de la estrategia de guiado *I - LOS* en conjunto con el *MPC* es efectiva, ya que se sigue la trayectoria cumpliendo satisfactoriamente los requisitos de respuesta transitoria y las restricciones en la señal de mando y en la salida.

CONCLUSIONES

Como resultado final de esta investigación se ha diseñado un controlador predictivo de dirección, que cumple con los requisitos especificados para el seguimiento de caminos rectos sin considerar restricciones temporales por parte del *HRC - AUV*. A partir de este resultado, se plantean las siguientes conclusiones generales:

- Considerando la revisión realizada en la literatura especializada sobre las estrategias de control de dirección aplicadas en *AUV*, es posible determinar una ley de control de dirección basada en *MPC*, para el *HRC - AUV*, que en conjunto con la estrategia de guiado *I - LOS*, asegura un adecuado desempeño del vehículo durante el seguimiento de un camino recto sin restricciones temporales.
- El modelo de *2 GDL* del subsistema lateral del *HRC - AUV*, constituye una representación matemática eficaz en la síntesis del controlador predictivo de dirección.
- El esquema de control de dirección predictivo basado en el modelo dinámico es capaz de cumplir con las especificaciones de diseño ante cambios continuos en el rumbo del vehículo, tal como se evidencia en simulaciones.
- Con las simulaciones numéricas se demuestra que el controlador de dirección predictivo, de conjunto con el algoritmo de guiado *I - LOS*, garantiza el desempeño requerido del sistema, por lo que constituye una solución factible para el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales, considerando las limitaciones físicas de los actuadores y en presencia de corrientes marinas.

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:

- Implementar en lenguaje de programación C la estrategia de control propuesta, para ser incorporada en el código de la PC industrial del *HRC - AUV* con vistas a su evaluación durante pruebas experimentales.
- Evaluar la posibilidad de diseñar una estrategia de guiado y control de dirección para el *HRC - AUV*, utilizando solo el control predictivo basado en modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albiez, J.; Duda, A.; Fritsche M.; Rehrmann F.; Kirchner F. (2015). An autonomous optical inspection head for auvs. *Robotics and Autonomous Systems* **67**, 72–79.
- Arshad, M. R.; Radzak, M. Y. (2004). Design and development of an autonomous underwater vehicle test-bed (usm-auv i). In: *8th Control, Automation, Robotics and Vision Conference. ICARCV*. Vol. 1. IEEE. Kunming, China. pp. 257–260.
- AUVAC (2017). *Autonomous Undersea Vehicle Applications Center*. <http://www.auvac.org/>. Último acceso: 10/03/2017.
- Banazadeh, A.; Ghorbani, M.T. (2013). Frequency domain identification of the nomoto model to facilitate kalman filter estimation and PID heading control of a patrol vessel. *Ocean Engineering* **72**, 344 – 355.
- 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.
- Bo, L.; Tsung-Chow, S. (2016). Nonlinear heading control of an autonomous underwater vehicle with internal actuators. *Ocean Engineering* **125**, 103 – 112.
- Børhaug, E.; Pavlov, A.; Pettersen K. Y. (2008). Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents. In: *47th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE Xplore. Cancún, México. pp. 4984 – 4991.
- 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.
- Caharija, W.; Pettersen, K.Y.; Gravdahl J.T.; Børhaug E. (2012). Path following of underactuated autonomous underwater vehicles in the presence of ocean currents. In: *51st IEEE Conference on Decision and Control*. Maui, Hawaii, USA.
- Camacho, E.F.; Bordons, C. (2004). Control predictivo: Pasado, presente y futuro. *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial (RIAI)* **1**(3), 5–28.
- Chavez, A. G.; Fontes, J.; Afonso P.; Pfingsthorn M.; Birk A. (2016). Automated species counting using a hierarchical classification approach with haar cascades and

- multi-descriptor random forests. In: *OCEANS 2016-Shanghai*. IEEE Xplore. Shanghai, China. pp. 1–6.
- Chen, W.; Wei, Y.; Zeng J.; Han H.; Jia X. (2016). Adaptive Terminal Sliding Mode NDO-Based Control of Underactuated AUV in Vertical Plane. *Discrete Dynamics in Nature and Society* **2016**, 1–9.
- Costa, D. (2016). Estrategia de guiado para el seguimiento de objetivos móviles por parte del vehículo subacático HRC-AUV. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- 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.
- de Sousa, J. B.; Pereira, J.; Alves J.; Galocha M.; Pereira B.; Lourenço C.; Portuguesa M. (2015). Experiments in multi-vehicle operations: The rapid environmental picture atlantic exercise 2014. In: *OCEANS 2015 - Genova*. IEEE. Génova, Italia. pp. 1–7.
- 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.; Ross, A. (2006). *Advances in unmanned marine vehicles*. Chap. Nonlinear modelling, identification and control of UUVs, pp. 13–42. Vol. 69. Peter Peregrinus LTD. UK.
- Garcia, 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.
- Guls, J.; Bjarnason, Ó. I.; Pétursson Ó.; Einarsson S.; Foley J. T. (2016). Application of Axiomatic Design in Designing Autonomous Underwater Photography Lighting. *Procedia CIRP* **53**, 278–283.
- Hegrenæs, O.; Hallingstad, O.; Jalving B. (2007). Comparison of mathematical models for the *hugin 4500 auv* based on experimental data. In: *THE IEEE Internatinal*

- Symposium on Underwater Technology*. IEEE Xplore. Japón. 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.
- Isa, K.; Arshad, M. R. (2013). Modeling and motion control of a hybrid-driven underwater glider. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* **42**(8), 971–979.
- 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 Engeniering* **19**(4), 497–501.
- 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. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Khoshrou, A.; Aguiar, A. P.; Pereira F. L. (2016). *Adaptive Sampling Using an Unsupervised Learning of GMMs Applied to a Fleet of AUVs with CTD Measurements*. Chap. Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference: Advances in Robotics, Volume 1, pp. 321–332. Springer International Publishing. Cham, Alemania.
- Kumar, S. A.; Warier, R.; Sukumar S. (2017). Adaptive tracking of position and attitude of an underwater rigid-body. In: *2017 Indian Control Conference (ICC)*. Vol. 1. IEEE Xplore. Guwahati, India. pp. 432–436.
- Lakhekar, G. V.; Waghmare, L. M.; Londhe P. S. (2015). Enhanced dynamic fuzzy sliding mode controller for autonomous underwater vehicles. In: *Underwater Technology*. IEEE. Chennai, India. pp. 1–7.
- Lekkas, A. M. (2014). Guidance and Path-Planning Systems for Autonomous. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- Lekkas, A. M.; Fossen, T. I. (2013). *Advanced in marine robotics*. Chap. Line-of-Sight guidance for path following of marine vehicles, pp. 63–92. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Li, Z.; Sun, J.; Oh S. (2009). Path following for marine surface vessels with rudder and roll constraints: an mpc approach. In: *American Control Conference*. IEEE. St. Louis, Estados Unidos. pp. 3611–3616.
- Liu, T.; Dong, Z.; Du H.; Song L.; Mao Y. (2017). Path following control of the underactuated usv based on the improved line-of-sight guidance algorithm. *Polish Maritime Research* **24**(1), 3–11.
- Løvskar, S. S. (2017). Positioning of periodic acoustic emitters using an omnidirectional hydrophone on an AUV platform. Tesis de maestría. NTNU.

- López, L. (2013). Técnicas de control lineales cuadráticas aplicadas en el diseño de autopiloto para un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Luczynski, T.; Pflingsthor, M.; Birk A. (2017). The pinax-model for accurate and efficient refraction correction of underwater cameras in flat-pane housings. *Ocean Engineering* **133**(3), 9–22.
- Maciejowsky, J. (2002). *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall. Nueva York, Estados Unidos.
- 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 Brussel. Bruselas, Bélgica.
- 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, Y. (2012). Estrategias de control de profundidad para un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. UCLV. Santa Clara, Cuba.
- Miranda, L. (2016). Sistema de guiado desacoplado en 3D para el vehículo HRC-AUV. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Moreno, H.A; Saltarén, R.; Puglisi L.; Carrera I.; Cárdenas P.; Álvarez C. (2014). Robótica submarina: Conceptos, elementos, modelado y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **11**(1), 3–19.
- Naeem, W. (2002). Model predictive control of an autonomous underwater vehicle. In: *UKACC Control Conference*. IEEE. Gran Bretaña. pp. 19–23.
- Ochi, M. K. (1998). *Ocean Waves. The Stochastic Approach*. Cambridge University Press, ISBN-13: 978-0-521-56378-9. Gran Bretaña.
- Oh, S-K.; Sun, J. (2010). Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control. *Ocean Engineering* **37**(2), 289–295.
- Pavlov, A.; Nordahl, H.; Breivik M. (2009). Mpc-based optimal path following for underactuated vessels. *IFAC Proceedings Volumes* **42**(18), 340–345.
- Py, F.; Pinto, J.; Silva M. A.; Johansen T.; Rajan K. (2016). Europtus: A mixed-initiative controller for multi-vehicle oceanographic field experiments. In: *Int. Symp. Experimental Robotics*. Springer. Guwahati, India.

- Qi, D.; Feng, J.; Yang J. (2016). Longitudinal motion control of auv based on fuzzy sliding mode method. *Journal of Control Science and Engineering* **2016**(5), 5–12.
- Rawlings, J. B.; Mayne, D. Q. (2015). *Model predictive control: theory and design*. Nob Hill Pub. Madison, Wisconsin, Estados Unidos.
- Richalet, J.; O'Donovan, D. (2009). *Predictive Functional Control*. Advances in Industrial Control. Springer London. London.
- Rodríguez, Y. (2011a). 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.
- Rodríguez, Y.; Lemus, J. L. (2011b). Sistema para supervisión y control de vehículo autónomo subacuático. In: *XIV Convención y Feria Internacional Informática*. MIC. La Habana, Cuba.
- Rossiter, J. A. (2003). *Model-based predictive control: a practical approach*. Control series. CRC Press. Boca Ratón, Estados Unidos.
- Rout, R. (2017a). Design and Experimental Realization of Adaptive Control Schemes for an Autonomous Underwater Vehicle. Tesis doctoral. National Institute Of Technology Rourkela. Rourkela, India.
- Rout, R.; Subudhi, B. (2017b). Inverse optimal self-tuning PID control design for an autonomous underwater vehicle. *International Journal of Systems Science* **48**(2), 367–375.
- Ruud, F. J. (2016). Autonomous Homing and Docking of AUV Remus 100 - Homing and Docking Guidance Algorithm and Relative Localization. Tesis de maestría. NTNU.
- 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.
- Sato, Y.; Maki, T.; Masuda K.; Matsuda T.; Sakamaki T. (2017). Autonomous docking of hovering type auv to seafloor charging station based on acoustic and visual sensing. In: *2017 IEEE Underwater Technology (UT)*. IEEE. Busan, South Korea. pp. 1–6.
- Seborg, D. E.; Mellichamp, D. A.; Edgar T. F.; Doyle F. J. (2010). *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons. Nueva York, Estados Unidos.
- Sehuveret, D. (2016). Estrategia de guiado para el seguimiento de caminos formados por líneas rectas y segmentos de curvas por parte de un AUV. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- 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.
- Song, Y. S.; Arshad, M. R. (2015). Sliding mode depth control of a hovering autonomous underwater vehicle. In: *IEEE International Conference on Control System*,

- Computing and Engineering*. IEEE. Penang, Malasia. pp. 435–440.
- Steenenson, L. V.; Turnock, S. R.; Phillips A. B.; Harris C.; Furlong M. E.; Rogers E.; Wang L.; Bodles K.; Evans D. W. (2014). Model predictive control of a hybrid autonomous underwater vehicle with experimental verification. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* **228**(2), 166–179.
- 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.; 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.
- Valeriano, 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.
- Vasilijevic, A.; Nad, D.; Mandic F.; Miskovic N.; Vukic Z. (2017). Coordinated navigation of surface and underwater marine robotic vehicles for ocean sampling and environmental monitoring. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **PP**(99), 1–11.
- Veremey, E. I. (2012). H_∞ - approach to wave disturbance filtering for marine autopilots. *IFAC Proceedings Volumes* **45**(27), 410–415.
- Wang, W. H.; Engelaar, R. C.; Chen X. Q.; Chase J. G. (2009). *Mobile Robots: State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions*. Chap. The state-of-art of underwater vehicles-theories and applications, pp. 129–152. InTech. Viena, Austria.
- Weichao, S.; Dazheng, W.; Mehmet A.; Bin G.; Kwang S. (2015). Optimal design of a thin-wall diffuser for performance improvement of a tidal energy system for an auv. *Ocean Engineering* **108**(1), 1–9.
- Xiao, L.; Jouffroy, J. (2014). Modeling and nonlinear heading control of sailing yachts. *IEEE Journal of Oceanic engineering* **39**(2), 256–268.
- Yang, R.; Clement, B.; Mansour A.; Li H. J.; Li M. (2015). Robust heading control and its application to ciscree underwater vehicle. In: *OCEANS 2015 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. IEEE. Washington, Estados Unidos. pp. 1–6.
- Yao, X.; Yang, G. (2016). Efficient Multivariable Generalized Predictive Control for Autonomous Underwater Vehicle in Vertical Plane. *Mathematical Problems in Engineering* **2016**, 1–9.

- Yao, X.; Yang, G.; Peng Y. (2017). Nonlinear reduced-order observer-based predictive control for diving of an autonomous underwater vehicle. *Discrete Dynamics in Nature and Society* **2017**, 1–15.
- Zambrano, J.; González, A. (2013). Implementación de un algoritmo de control predictivo en espacio de estados sobre una plataforma de simulación desarrollada en matlab. *Ingenius* **2013**(9), 5–14.
- Zamora, H. L. (2011). Control de trayectoria para el HRC-AUV considerando el efecto del oleaje y las corrientes marinas. Trabajo de diploma. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.
- Zhang, F.; Tan, X. (2013). Gliding robotic fish and its tail-enabled yaw motion stabilization using sliding mode control. In: *ASME Dynamic Systems and Control Conference*. The American Society of Mechanical Engineers. California, Estados Unidos. pp. 1–10.

ANEXO A

MODELOS DINÁMICOS PARA EL *HRC* - *AUV*

A.1. Modelo no lineal de 6 *GDL* para la simulación

En esta investigación el modelo dinámico no lineal de 6 *GDL* del *HRC* - *AUV*, es utilizado durante la evaluación mediante simulación del desempeño de la estrategia de guiado y el controlador diseñado para el vehículo. Los datos geométricos e inerciales que caracterizan a este vehículo se presentan en la Tabla 1-1. Por su parte, los términos de masas añadidas se calcularon luego de aproximar la geometría del vehículo a un elipsoide alargado, obteniéndose los siguientes valores: $X_{\dot{u}} = -250,84 \text{ kg}$, $Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}} = -3 \text{ 834 kg}$, $K_{\dot{p}} = 0$ y $M_{\dot{q}} = N_{\dot{r}} = -15 \text{ 572 kgm}^2$.

La estructura del modelo dinámico se presenta en la ecuación (2.6) (Ver el capítulo 2).

La matriz $\mathbf{M}$ del modelo no lineal de 6 *GDL* del *HRC* - *AUV*, queda determinada como:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 4345,4 & 0 & 0 & 0 & 91 & 0 \\ 0 & 7929 & 0 & -91 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7929 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -91 & 0 & 450,1 & 0 & -275 \\ 91 & 0 & 0 & 0 & 36582 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -275 & 0 & 36388 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.1})$$

mientras que la matriz $\mathbf{C}(\mathbf{v})$, queda de la manera siguiente:

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 91r & 7929w & -7929v \\ 0 & 0 & 0 & -7929w & 91r & 4535,4u \\ 0 & 0 & 0 & 7929v - 91p & -4535,4u - 91q & 0 \\ -91r & 7929w & -7929v + 91p & 0 & -275p + 36388r & -36582q \\ -7929w & -91r & 4535,4u + 91q & 275p - 36388r & 0 & 450,1p - 275r \\ 7929v & -4535,4u & 0 & 36582q & -450,1p + 275r & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.2})$$

El vector de fuerzas gravitacionales y de flotabilidad $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ para el *HRC - AUV*, queda calculado como:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} 0, & 0, & 0, & 890,5c\theta s\phi, & 890,5s\theta, & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (\text{A.3})$$

La matriz $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ del modelo no lineal de 6 *GDL* del *HRC - AUV* queda definida como:

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = -\text{diag}\{181,45 + 47,49|u|, 1219,8, 1219,8, 126,62, 9096,9, 9096,9\}. \quad (\text{A.4})$$

El vector de fuerzas y momentos producidos por las entradas de control queda definido como:

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

A.2. Modelo de 2 *GDL* para el subsistema lateral

El modelo dinámico de 2 *GDL* del subsistema lateral del *HRC - AUV* queda expresado a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,25 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,035 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_T. \quad (\text{A.6})$$

ANEXO B
CÓDIGO PARA EL CÁLCULO DE LA
DISTANCIA RECORRIDA POR EL VEHÍCULO
HRC - AUV

```
clear all  
clc
```

```
pts = [0    0  
       215 646  
       921 520  
       120 -55  
       -546 -294];
```

```
a = pts(:,1);  
b = pts(:,2);  
d = 0;  
k = 1;
```

```
for(i = 1:length(pts) - 1)  
d = d + sqrt((a(k) - a(k+1))^2 + (b(k) - b(k+1))^2);  
k = k+1;  
end
```