





FIE Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Control Automático

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Implementación de estrategias de filtrado de perturbaciones para el control del vehículo HRC-AUV

Autor: Jorge Lázaro Aragón Bello Tutor: M.Sc Delvis García García

> Santa Clara, Junio 2019 Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria "Chiqui Gómez Lubian" subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830 Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

"La ciencia puede descubrir lo que es cierto, pero no lo que es bueno, justo y humano.".

Marcus Jacobson.

DEDICATORIA

A toda mi familia por el amor y apoyo incondicional. A mis padres por ser los mejores.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos por ser parte de mi vida. A todos los profesores que ayudaron en mi formación profesional. A mi tutor Delvis, por su ayuda y brindarme de su tiempo, dedicación y conocimiento. A todos los que hicieron posible que este momento llegara.

Santa Clara, Cuba, 2019

RESUMEN

Los vehículos autónomos submarinos desde hace varios años han tenido un gran auge debido a las grandes ventajas que constituye su empleo. Para su autonomía, estos vehículos poseen de un sistema de control de movimiento. Dentro de los 3 componentes principales del Sistema de Control de Movimiento se encuentra el sistema de navegación encargado de obtener la información de los sensores y filtrarla, debido a que las mismas se encuentran contaminadas con las perturbaciones marinas que afectan estos vehículos. Se implementan en C observadores pasivos lineales para filtrar las variables necesarias en los lazos de control de rumbo y profundidad. Por otra parte, se realiza el diseño de un observador no lineal de ganancia variable para el control en el plano horizontal. Las implementaciones son evaluadas mediante simulaciones, obteniendo en ellas un buen desempeño en presencia de perturbaciones.

TABLA DE CONTENIDO

	1	•	
Ρ	ิล	σ_1	na
	cu,	51	110

PEN	ISAMI	ENTO	III
DEI	DICAT	ORIA	IV
AGI	RADE	CIMIENTOS	V
RES	SUMEN	ν	Ι
INT	RODU	CCIÓN	1
1.	Revis veh	ión bibliográfica relacionada con las técnicas de filtrado y estimación para ículos marinos	6
	1.1.	Vehículos Autónomos Submarinos	6
	1.2.	Vehículo <i>HRC-AUV</i>	9
	1.3.	Perturbaciones marinas	11
		1.3.1. Oleaje en el dominio del tiempo	12
		1.3.2. Oleaje en el dominio de la frecuencia	13
		1.3.3. Espectro del oleaje	14
	1.4.	Filtrado del oleaje.	14
		1.4.1. Métodos convencionales	14
		1.4.2. Observadores de estado	16
	1.5.	Consideraciones finales del capítulo	18
2.	Imple	ementación de las estrategias de filtrado de las perturbaciones	19
	2.1.	Introducción	19
	2.2.	Nomenclatura y sistema de coorderandas empleado $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	19
	2.3.	Ecuaciones dinámicas del vehículo	21
	2.4.	Modelo lineal de las olas	22
	2.5.	Observador del oleaje para el control de dirección	23
		2.5.1. Ecuaciones del observador de rumbo	24

		2.5.2. Ecuaciones discretas del observador de rumbo	26
		2.5.3. Resultados de la implementación del observador de rumbo	26
	2.6.	Observador del oleaje para el control en el plano vertical $\ldots \ldots \ldots$	29
		2.6.1. Ecuaciones del observador de profundidad	30
		2.6.2. Ecuaciones discretas del observador de profundidad $\ \ldots\ \ldots\ \ldots$	32
		2.6.3. Resultados de la implementación del observador de profundidad	33
	2.7.	Consideraciones finales del capítulo	36
3.	Obser	vador de ganancias ajustables	38
	3.1.	Introducción	38
	3.2.	Modelos empleados en el observador no lineal $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	38
		3.2.1. Modelo del vehículo en el plano horizontal $\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots\ \ldots$	39
		3.2.2. Modelo para representar el oleaje	40
		3.2.3. Modelo para representar las corrientes y fuerzas de deriva de las olas	42
	3.3.	Diseño del observador de estados	42
	3.4.	Resultados	44
	3.5.	Análisis económico y medioambiental	48
	3.6.	Consideraciones finales del capítulo	48
COI	NCLUS	SIONES	50
REC	COME	NDACIONES	51
REF	FEREN	ICIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

INTRODUCCIÓN

El mundo de la robótica ha llegado a un punto en el cual se construyen una gran cantidad de vehículos operados manualmente con diferentes fines que van desde misiones de gran importancia y complejidad hasta la realización de competencias y eventos recreativos. Existen ciertos ambientes naturales donde la comunicación no es un factor que está a nuestro favor por lo que constituyen un área perfecta para la utilización de vehículos autónomos. Uno de ellos, es el ambiente marino, principalmente en exploraciones y estudios submarinos. Con el transcurso de los años se ha presenciado de un gran interés por dominar este campo; hoy en día el estudio y uso de los vehículos submarinos ha crecido exponencialmente debido a la necesidad del hombre de expandir sus fronteras y adentrarse en los mares y océanos los cuales abarcan más del 70 % de la superficie del planeta. En este medio se encuentran diversos recursos naturales y reservas ecológicas colocando estos vehículos como el centro de estudio de diversas instituciones y universidades a nivel mundial (Carreras, 2018) (Nezvadovitz, 2015). El campo de aplicación es muy extenso y abarca desde lo científico, militar, industrial e incluso eventos lúdicos.

Cuando se habla acerca de un vehículo subacuático o submarino, este puede corresponderse a diversos tipos (Blidberg, 2001). Entre ellos, se encuentran aquellos que son remolcados en la parte trasera de otro vehículo marino. También están los vehículos operados remotamente (*Remotly Operated Vehicle* o ROV); estos son operados directamente por el usuario con un cable utilizado como medio de comunicación. Por otra parte, existe un vehículo más avanzado y que no requiere comunicación para navegar: el vehículo autónomo submarino (*Autonomous Underwater Vehicle* o AUV).

A diferencia de los demás vehículos subacuáticos, los AUVs no dependen de una comunicación con el operador en el transcurso de la misión. Para ello cuentan con un medio de cómputo abordo que controla y toma las decisiones en base a la misión predefinida y a las mediciones realizadas por los sensores de la nave (Thirunavukkarasu, 2017). Como sustitución de la función del operador presentan un Sistema de Control de Movimiento (SCM), comportándose como un cerebro para la máquina, tomando el control de esta. Los AUVs constituyen vehículos submarinos auto-guiados y auto-propulsados permitiendo que puedan ser utilizados para muchas aplicaciones.

Para mantener un adecuado control de estos medios acuáticos es necesario disponer en todo momento de estimaciones de las principales variables que describen su comportamiento (posición y velocidad), y también eliminar o atenuar el ruido en las mediciones provocado por la incidencia de las perturbaciones cuando se navega (Guzmán, 2018). En el caso de los vehículos marinos, las principales perturbaciones son el efecto provocado por el oleaje y por las corrientes marinas. En la presente tesis se profundiza solamente en el tema del oleaje como perturbación.

Muchas son las técnicas de filtrado para contrarrestar el efecto de las olas, entre las cuales se encuentran la utilización de la banda muerta; los filtros paso bajo y supresor de banda configurados en cascada; y además el uso de los estorimadores de estado, como un método más avanzado y eficiente muy utilizado (Fossen, 2011)(Ali, 2019).

Para comprobar la veracidad de los filtros diseñados mediante la simulación se necesita además de un modelo que represente estas perturbaciones. Para el caso del oleaje, existen modelos del espectro del oleaje con el fin de simularlo como lo son el modelo de Neumann, el de Bretschneider, y los desarrollados por Pierson-Moskowitz (Fossen, 1994). Cada modelo con diferentes requisitos y objetivos en cuanto a su uso. Estos modelos cuentan con aproximaciones que pueden ser no lineales o lineales, las cuales facilitan el diseño de los filtros. La utilización de estos modelos constituye una gran ventaja ya que condiciona una completa simulación del proceso, ahorrando costos millonarios provocados a la hora de la construcción del vehículo. Las pruebas reales también constituyen otra fuente que encarece la investigación, a pesar de que en ellas se obtienen mejores resultados.

Dada la característica de Cuba de ser una isla pequeña con disímiles recursos naturales en los mares a nuestro alrededor, para nuestro país resulta de vital importancia contar con medios de este tipo; pudiendo realizarse diversas actividades. Entre las más destacadas que pueden ser desarrolladas por el país se encuentran la instalación y supervisión de estructuras submarinas, el cuidado de los recursos marinos y la realización de estudios hidrográficos.

El Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) adscripto al Departamento de Automática de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV) se encuentra desarrollando varios proyectos de vehículos autónomos con estos fines. Uno de estos proyectos es el HRC-AUV, vehículo desarrollado entre el GARP y el Centro de Investigaciones y Desarrollo Naval (CIDNAV). Estas dos instituciones comienzan su trabajo en conjunto desde el año 2009, siendo estos los primeros proyectos que se desarrollan de este tipo en Cuba. En el desarrollo del proyecto HRC-AUV ambas instituciones se distribuyen las tareas teniendo en cuenta su campo de acción. En la construcción del vehículo, específicamente en el diseño mecánico el encargado de su conformación es el CIDNAV; mientras que el GARP tiene asignada la tarea de desarrollar el Sistema de Control de Movimiento, lo cual implica el desarrollo de tres partes fundamentales: el sistema de control, el sistema de guiado y el sistema de navegación posteriormente descritos en el capítulo 1. Estas instituciones se han trazado como objetivos comunes la conformación de un vehículo autónomo sumergible de total factura nacional y que conste de una arquitectura de hardware y sistema sensorial de bajo costo (Martínez, 2013).

INTRODUCCIÓN

En la investigación del proyecto HRC-AUV, y como base para el desarrollo de esta tesis se tiene el modelo dinámico de 6 grados de libertad de la nave; dos sub-modelos derivados de este, uno del sub-sistema lateral y el otro del longitudinal del vehículo (Valeriano, 2013*a*); y un observador de rumbo y otro de profundidad correspondiente a cada subsistema (Valeriano, 2013*b*). Además, se cuenta con modelos matemáticos que describen el comportamiento de las perturbaciones (Valeriano, 2013*a*).

Los efectos medioambientales provocados por las corrientes marinas y las olas afectan el desempeño de los vehículos que operan en el mar. Las estrategias de filtrado de perturbaciones existentes para el *HRC-AUV* son diseñadas para condiciones del mar que son fijadas antes de comenzar la misión. Como consecuencia trae que, ante cambios en el estado del mar, se afecte directamente el desempeño de las estrategias implementadas. Para evitar este conflicto, surge la necesidad de implementar estrategias que impliquen adaptabilidad a las condiciones del mar. Estos tipos de algoritmos generalmente se diseñan haciendo uso de modelos no lineales debido a la dinámica no lineal y al alto grado de interacción que caracteriza la dinámica de los vehículos marinos (Wang, 2015)(Zhang, 2018).

Como resultados de otras investigaciones se cuentan con varias estrategias de filtrado recreadas en el Simulink de Matlab mediante bloques (García, 2014). Algunas de estas estrategias han sido traducidas al lenguaje C y evaluadas mediante las *S-functions* que permiten integrar el código al Simulink. Para su traducción se utilizaron algoritmos que incluyen el uso de métodos y librerías de alto nivel para trabajo matricial. Estos demandan una capacidad de cómputo considerable, y requieren el uso de un hardware de alto costo.

El implementar directamente las estrategias de filtrado que dependen del software Matlab o bien requieren constantes cálculos matriciales ejecutados en tiempo real, requiere medios de cómputo de alto procesamiento. Actualmente el hardware del HRC-AUV ha migrado hacia un sistema empotrado que solamente incorpora una matriz de puertas programables (FPGA, Field-Programmable Gate Array) y un dcPIC para ejecutar los algoritmos. La etapa del filtrado se programa en el dsPIC, por lo que es imprescindible llevar a cabo implementaciones optimizadas y eficientes para que puedan ejecutarse en tiempo real. Además, entre los objetivos trazados para la conformación del proyecto HRC-AUV se encuentra el empleo de hardware de bajo costo. El algoritmo resultante puede ser co-simulado directamente en Simulink con ayuda de los bloques S-function y S-Function builder, pudiendo así obtener los valores a la salida. Según las ideas planteadas anteriormente, se plantea el siguiente problema científico:

Problema Científico:

Optimizar e implementar estrategias, de manera que puedan ser ejecutadas en el hardware basado en dsPIC y FPGA diseñado para el vehículo bajo estudio.

En esta investigación se pretende darle cumplimiento a los siguientes objetivos:

Objetivo General:

Implementar diversas estrategias de navegación y filtrado de perturbaciones para el vehículo *HRC-AUV*.

Objetivos Específicos:

- Analizar los fundamentos teóricos relacionados con el filtrado de perturbaciones para los vehículos marinos.
- Optimizar desde el punto de vista de complejidad computacional las estrategias de filtrado y navegación diseñadas para ser empleadas en el *HRC-AUV*.
- Implementar en lenguaje C estrategias optimizadas para su uso en el hardware a bordo del vehículo.
- Validar mediante co-simulación en Matlab las implementaciones desarrolladas.

Viabilidad: Resulta factible la implementación ya que sin esta no sería posible emplear las estrategias de filtrado en el hardware del *HRC-AUV*. Grandes proyectos de vehículos marinos requieren de un presupuesto millonario mientras que el proyecto que se trata no dispone de dicha facilidad, buscando vías donde se utilicen elementos tecnológicos de bajo costo. Se encuentra disponible abundante documentación y acceso a la información referente al tema que se investiga, además de la existencia de trabajos precedentes que constituyen un punto de partida para la investigación.

Posibles resultados: Como resultado final se pretende disponer de una implementación factible de un código para el filtrado de perturbaciones para el vehículo *HRC-AUV* el cual podrá ser integrado en el hardware especificado. El obtener un observador no lineal con la característica de adaptarse a las condiciones del oleaje. Contar con una documentación que contribuya en la investigación de otros proyectos de tesis que se realizan conjuntamente en paralelo a este y también en proyectos futuros.

Organización del informe:

- Capítulo I: Expone acerca de la revisión bibliográfica del problema en estudio, actualidad y las principales metodologías utilizadas; dando a conocer al comenzar algunas de las aplicaciones de los vehículos autónomos marinos, mencionando diferentes universidades de alto reconocimiento a nivel mundial que se adentran en las investigaciones relacionadas con el tema. Muestra las características del *HRC-AUV*, investigación en curso que realiza la universidad en conjunto con otras instituciones. Se adentra en el tema de las perturbaciones marinas, específicamente en el oleaje. Finalmente se realiza una búsqueda de los métodos convencionales y más usados actualmente para el filtrado del oleaje como perturbación.

- Capítulo II: Se implementa un observador de estado discreto para el control de rumbo y otro para el control de profundidad. Se exponen las ecuaciones y los modelos de los observadores, al igual que las expresiones discretas para su implementación. Los resultados son validados mediante simulaciones.
- Capítulo III: Se implementa un observador de estado no lineal de ganancias ajustables en el tiempo (en inglés *gain-scheduling*) con la capacidad de adaptabilidad a los cambios de estado del mar. Se exponen las ecuaciones y modelos utilizados por el observador. Los resultados se evalúan mediante simulaciones.
- Conclusiones: Se exponen las conclusiones de la tesis.
- Recomendaciones: Son mostradas las recomendaciones.
- Referencias bibliográficas: Se muestra el material bibliográfico consultado.
- Anexos: Se muestran los anexos de la tesis.

Capítulo 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA RELACIONADA CON LAS TÉCNICAS DE FILTRADO Y ESTIMACIÓN PARA VEHÍCULOS MARINOS

En el presente capítulo se exponen los conceptos y características principales relacionados con los AUVs. Se mencionan además algunas de sus aplicaciones, haciendo énfasis en destacados proyectos en desarrollo a nivel mundial que involucran diversas universidades y centros de investigación.

Posteriormente se realiza una descripción de los principales elementos del proyecto HRC-AUV, en el cual se enmarca este trabajo. Se introduce el tema de las perturbaciones marinas, dedicando especial interés al tema del oleaje. En este sentido se abordan distintas alternativas o algoritmos para contrarrestar los efectos del oleaje en las mediciones de los sensores de posicionamiento instalados en este tipo de vehículos.

1.1. Vehículos Autónomos Submarinos

Los AUVs, como vehículos autónomos que son, representan una clase de robot especializado, capaces de percibir el medio que le rodea y que cuentan con una arquitectura de control que le otorga la capacidad de navegar de manera autónoma. Una vez programada la misión y puesta en marcha pueden finalizarla sin depender de la comunicación directa con un operador humano. A diferencia de los vehículos marinos que solo operan en la superficie, estos no siempre cuentan con el apoyo de las señales de los satélites o redes de telefonía ya que no son recibidas del todo debajo del agua, dificultando el control de los mismos y requiriendo que tenga que subir a la superficie a menudo. El hecho de explorar sin la necesidad de que el hombre deba descender personalmente a las profundidades pudiendo incorporar una variedad de avances tecnológicos constituye una gran ventaja (Chen, 2018).

Para su total autonomía, los AUVs utilizan el SCM, siendo este el programa principal responsable de que se lleve a cabo la misión y usualmente está vinculado a una interfaz gráfica para facilitar su uso. Este sistema se compone por tres bloques esenciales: sistema de guiado, sistema de control y sistema de navegación; mostrada la estructura en la figura 1-1. El sistema de guiado genera la trayectoria a seguir por el vehículo, a partir de la misión creada por el operador. Una vez en marcha, los datos de la misión (posición, velocidad, aceleración) son enviados al sistema de control, el cual manipula los actuadores en relación a la señal recibida; este además recibe información del estado o las variables del sistema. Por último, el sistema de navegación es el encargado de obtener la información leída por los sensores del vehículo y de rectificarla con la ayuda de un observador de estados u otra estrategia de filtrado (Fossen, 2002) (Moreno, 2014).



Figura 1–1: Sistema de control de movimiento de los vehículos marinos.

Son muy variadas las aplicaciones de estos vehículos, van desde aplicaciones para lo científico, militar, industrial e incluso para fines lúdicos. A continuación se mencionan algunas de ellas:

- Vigilancia y acceso en áreas imposibles de alcanzar por el hombre.
- Batimetría de embalses y de puertos.
- Control de la calidad de agua y su estado ecológico.
- Estudios de la biología marina.
- Estudios meteorológicos.
- Construcciones e inspecciones de estructuras submarinas.
- Revisión de anclajes, cascos de barcos y de otros vehículos marinos.
- Operaciones de búsqueda y rescate.
- Usos recreacionales y competitivos.

Los primeros estudios de AUVs comenzaron en 1960, siendo construidos para aplicaciones muy específicas, existiendo muy pocos artículos publicados sobre estos temas en esos años (Robles, 2014). En los años 80, con el desarrollo tecnológico y los avances en la ingeniería de la época se logró la construcción de sistemas complejos de navegación y de algoritmos de control en vehículos autónomos, desencadenado así un gran crecimiento en el uso y la investigación de estos vehículos (Costa, 2016). En la actualidad han crecido grandemente en cuanto a su rentabilidad y habilidades técnicas; se busca como objetivo que lleguen a ser capaces de tomar decisiones por si solos. Para lograr esto son muchas las investigaciones realizadas especialmente en la autonomía, navegación, detección de objetos, fuentes de energías y sistemas de información (Arroyave, 2018)(Jones, 2019).

El instituto The Naval Postgraduate School of California está en constantes investigaciones acerca de estos vehículos desde 1988. Este tiene como proyectos de AUV el PHOENIX y el Acoustic Radio Interactive Exploratory Server (ARIES) ambos mostrados en la figura 1–2. El ARIES lo usan para hacer pruebas relacionadas con sistemas de navegación mientras que el PHOENIX para probar sistemas de control en los AUVs (González, 2004).



(a) ARIES AUV (b) PHOENIX AUV Figura 1–2: Proyectos de la Naval Postgraduate School of California.

El AUV HUGIN, proyecto comenzado a mediados de 1990 desarrollado en conjunto por el Norwegian Defence Research Establishment (FFI) y Kongsberg Maritime Institute en Noruega, con el cual han diseñado varios modelos entre los que se encuentran el HUGIN I, el HUGIN 1000, el HUGIN 3000 y el HUGIN 4500, con aplicaciones tanto civiles como militares (Lågstad, 2005). Los vehículos de estos proyectos utilizan un costoso sistema sensorial, y desde el 2001 están realizando pruebas reales, encareciendo el más proyecto, pero obteniendo mejores resultados que en la simulación.

El Sparus II AUV, vehículo desarrollado por la Universidad de Girona en España, tiene forma semejante a la de un torpedo con la parte delantera libre en espacio, pudiendo añadir distintos equipamientos en dependencia de la aplicación que se quiera desarrollar (Carreras, 2018).

El AUV ORCA, desarrollado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) que ha dedicado años a su estudio y obtuvo el primer lugar en la Annual Association for Unmaned Vehicles System International (Evento Anual de la Asociación Internacional de Sistema de Vehículos No Tripulados), siendo en algunas ocasiones el único vehículo en completar la misión (Sharples, 2010). Otras universidades han enfocado sus estudios en estos proyectos como es la Universidade de São Paulo en Brasil con el AUV Pirajuba, la Universidad de Kasetsart en Tailandia con el ZEABUS 2018 (Siriyakorn, 2019), y la Universidad de la Florida con el SubjuGator AUV (Nezvadovitz, 2015). Todos estos proyectos mencionados anteriormente implican el uso de elementos tecnológicos avanzados por lo que en su mayoría son proyectos que se han llevado a cabo con fondos millonarios en países con un alto desarrollo económico.

1.2. Vehículo HRC-AUV.

En Cuba no existían proyectos asociados a los AUVs. En el año 2009 comienza un nuevo proyecto involucrando a estos vehículos. Este surge como una necesidad para el país de realizar labores de exploración y estudio de las costas cubanas, siendo una iniciativa de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas en conjunto con el *CIDNAV*. El proyecto tiene como finalidad la conformación de un vehículo subacuático el cual pueda desempeñar misiones de una manera autónoma, capaz de operar en misiones de supervisión y exploración marina, y además que conste de un bajo presupuesto (Valeriano, 2018). En el transcurso de la investigación el GARP ha trabajado en el diseño e implementación de la arquitectura de hardware y la de software, donde incluye el modelado analítico del sistema y el diseño de estrategias de control y navegación del mismo. El *CIDNAV* se centró en la conformación del diseño mecánico conformando un vehículo simétrico similar al *STARFISH AUV* (Sangekar, 2008) y al *HUGIN 4500* (Hegrenaes, 2007).

En la realización del proyecto se tomaron como guía algunos aspectos para el logro de sus objetivos como lo son:

- Diseño de un vehículo capaz de realizar amplios desplazamientos para sus misiones de supervisión y exploración marina.
- Estrategias de control realizada basado en diseños clásicos con una alta fiabilidad.
- Disponibilidad de varios modos de trabajos para operar el vehículo.
- Hardware sencillo con elementos de bajo costo y fácil adquisición.
- Método de navegación con la menor dependencia posible de los factores externos.
- Los distintos niveles de software deben ponderar la funcionalidad y tener un carácter modular.

Características

Para el desplazamiento tiene integrado un propulsor y dos timones. Un timón vertical para el control de rumbo y un timón horizontal o elevador para el control de profundidad. El diseño mecánico del vehículo es mostrado en la figura 1–3. Su máxima profundidad de exploración está limitada a 10 metros y la descripción de las variables físicas se muestra en la tabla 1–1 (Martínez, 2013).

En (Valeriano, 2013*b*) se plantea el modelo dinámico de 6 grados de libertad (GDL) del HRC-AUV, así como los procedimientos para obtenerlo y también valida la efectividad del modelo a partir de la comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones contra los resultados reales de los experimentos. El modelo se corresponde con el comportamiento dinámico del vehículo. Este ha servido como base de investigaciones que son reconocidas



Figura 1–3: Diseño mecánico del HRC-AUV.

		110 .
Variable	Descripción	Valor
m	Masa	$4094.56 \ kg$
W	Peso	$40.208 \ kN$
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	$21010.4\ kgm^2$
I_{zz}	Momento de inercia	$20816 \ kgm^2$
I_{xz}	Momento de inercia	$275.44 \ kgm^2$
BG	Distancia entre el centro de gravedad	$[0,0,22 \text{mm}]^T$
	y el centro de flotabilidad	
δ_T	ángulo de deflexión del timón	$\pm 30 \text{ grados}$
	de rumbo	
δ_E	ángulo de deflexión del timón	$\pm 30 \text{ grados}$
	de profundidad	

Tabla 1–1: Parámetros físicos del $HRC\mathchar`-AUV.$

en la comunidad científica; utilizadas para el diseño de algoritmos de filtrado (García, 2014), estrategias de navegación y también de control para el vehículo subacuático objeto de estudio (Valeriano, 2018). El modelo dinámico de los 6 grados de libertad es dividido en dos sub-sistemas de 3 GDL cada uno (sub-sistema lateral y sub-sistema longitudinal) a partir de una linealización sobre el punto de operación. Partiendo de los dos sub-sistemas son conformadas las funciones de transferencia necesarias para establecer la acción de control sobre el vehículo. (Valeriano, 2013b). Así se obtienen modelos aún más reducidos de solo 1 GDL que son utilizados luego en los observadores de rumbo y profundidad.

Con los resultados obtenidos en las investigaciones (Martinez, 2015) y de (Valeriano, 2013b) fue posible obtener los parámetros de estas funciones de transferencias. Una vez conformadas, se realizó el diseño en el Simulink de Matlab un lazo de control para el rumbo y otro para la profundidad.

1.3. Perturbaciones marinas

Las perturbaciones marinas constituyen un factor a tener en cuenta en la navegación de un vehículo submarino ya que pueden alterar datos que afectan la misión en curso. Como principales disturbios medioambientales están el efecto provocado por las corrientes marinas y por el oleaje. Para el HRC-AUV existen métodos de guiado desarrollados que contrarrestan el efecto de las corrientes marinas, por lo que en la tesis se abordan soluciones solamente para el fenómeno del oleaje.

Para los vehículos marinos el efecto provocado por el oleaje constituye un obstáculo en el desempeño de las misiones, principalmente si este se encuentra navegando en la superficie. Si el disturbio no se logra compensar en tiempo real, la calidad de los datos obtenidos pueden ser severamente afectada. Por ejemplo en la construcción de modelos batimétricos se necesitaría de un tratamiento posterior para restaurar la calidad de los mapas (Dantas, 2014).

El oleaje es una manifestación directa de fuerzas actuantes sobre el fluido tendiendo a deformarlo con la ayuda de la fuerza de gravedad y la tensión superficial del fluido. Un ejemplo de estas fuerzas actuantes puede ser la acción de una ráfaga de viento o un objeto que impacte el líquido. Una vez que actúa la fuerza gravitacional y la tensión superficial, la ola es propagada de la misma manera que lo hace una onda en una cuerda tensa al agitarse. Las olas ocurren en diferentes formas y tamaños en dependencia de la magnitud de la fuerza que lo crea, por lo que es poco probable que una ola sea parecida a su consecutiva, ni tampoco que tenga su misma dirección (Dean, 1991).

A la hora de construir el sistema de control de movimiento del vehículo autónomo, es importante también tener en cuenta el oleaje. Para ello se considera que el movimiento total del sistema vehículo-oleaje es la suma de un componente denominado baja frecuencia (BF o también movimiento del vehículo) y otro denominado alta frecuencia (AF o también influencia de las olas); comportamiento mostrado en la figura 1–4. En dependencia de la aplicación del vehículo que se desarrolle, es el componente utilizado por el sistema de control de movimiento (bajas frecuencias, altas frecuencias o ambos componentes juntos) (Fossen, 2011). La separación de estos componentes permite que la medición contaminada en cualquiera de las variables de navegación, pueda ser obtenida aplicando el principio de superposición lineal.



Figura 1–4: Movimiento vehículo-oleaje (bajas frecuencias + altas frecuencias).

1.3.1. Oleaje en el dominio del tiempo

La superficie del mar puede ser interpretada como la superposición de una inmensa cantidad de ondas sinusoidales con diferentes direcciones y con una propiedad estocástica. Este fenómeno de superposición de las sinusoides permite un análisis de Fourier y técnicas con el espectro de las olas usados para la descripción matemática del océano (Dean, 1991). La figura 1–5 constituye un ejemplo de un posible registro de la altura $\zeta(x, t)$ de las olas con respecto a la superficie.



Figura 1–5: Ejemplo de un registro de la altura de la ola con respecto a la superficie.

En (Fossen, 2011) se plantea que la elevación del oleaje en el tiempo puede ser construida a partir de la suma de componentes de señales de ondas seno. En la ecuación 1.1 se muestra la elevación del oleaje $\zeta(\mathbf{x},t)$ como una sumatoria de elementos lineales y otra de elementos cuadráticos.

$$\zeta(x,t) = \sum_{i=1}^{N} A_i \cos(w_i t - k_i x + \phi) + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} A_i^2 \cos^2(w_i t - k_i x + \phi) + O(A_i^3)$$
(1.1)

En la ecuación 1.1 el término A_i es la amplitud de las olas, w_i es la frecuencia de cada componente, ϕ es un ángulo fase aleatorio y constante el tiempo en $[0, 2\pi]$; k_i tiene un valor para cada ola calculado como $k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$ en donde λ_i es el largo de la ola.

La ecuación 1.1 se repite en intervalos de tiempo de $\frac{2\pi}{\Delta w}$, siendo Δw la variación de frecuencias, es decir, la diferencia constante de dos frecuencias consecutivas. El primer término de la ecuación (la primera sumatoria) constituye una aproximación lineal del oleaje y tiene la misma frecuencia que la elevación de la ola $\zeta(x, t)$, mientras que el componente no lineal posee elementos de baja y alta frecuencia incluidos.

1.3.2. Oleaje en el dominio de la frecuencia

Para el análisis del oleaje, resulta conveniente el uso su espectro de frecuencia. Las energías potenciales y cinéticas de las olas se pueden representar mediante el espectro del oleaje (*wave spectrum* en inglés); este brinda información acerca de la magnitud de las olas en relación a su frecuencia; también el área debajo de la función de densidad espectral representa el grado de severidad del mar, mostrado en la figura 1–6.



Figura 1–6: Análisis frecuencial y temporal de la ola.

En la ecuación 1.1, la amplitud de A_i en cada componente de *i* depende de la función de densidad espectral del oleaje $S(w_i)$ de la manera (Fossen, 1994) (Ochi, 1998):

$$A_i^2 = 2S(w_i)\Delta w \tag{1.2}$$

donde w_i es la frecuencia de la ola $i \ge \Delta w$ es la diferencia de la frecuencia entre dos olas consecutivas.

La frecuencia situada alrededor de donde aparece mayor concentrada la energía en la figura 1–6 se le conoce como frecuencia modal y generalmente se sitúa en entre las frecuencias más bajas (Fossen, 1994).

1.3.3. Espectro del oleaje

Cuando en el mar existen crestas paralelas y unidireccionales a favor del viento, con una separación variable, se le conoce como mar irregular de crestas elevadas. Se conoce mar completamente desarrollado cuando el viento a soplado por cierto periodo de tiempo y las elevaciones pueden asumirse estables (Ochi, 1998). Un mar con las crestas elevadas comienza con ondas que crean un espectro con un pico de relativa alta frecuencia; sin embargo si está completamente desarrollado y tiene crestas muy elevadas, su espectro va a formar un pico de baja frecuencia.

Para determinar el espectro del oleaje son varios los métodos publicados, pudiendo utilizar variables como la fuerza del viento, la profundidad del mar, la gravedad, el área que ocupa la masa de agua donde se navega, la frecuencia y el periodo de las olas. Durante años se han realizado investigaciones acerca del espectro del oleaje generado por los vientos, llegándose a proponer varios modelos para lograr describir el comportamiento del oleaje mediante ecuaciones.

En 1952 se propone el modelo de Neumann que depende únicamente de la velocidad del viento. Entre otros espectros propuestos se encuentra el de Bretschneider en 1959 usando la frecuencia modal y la altura del oleaje, que sirve para oleajes unidireccionales en profundidades consideradas infinitas; el espectro de Pierson-Moskowitz (año 1963) creado para oleajes completamente desarrollados y el cual depende de la altura del oleaje o de la velocidad del viento; el espectro de Pierson-Moskowitz modificado, para mares de profundidad infinita y sin mareas y de *fetch* (distancia desde la costa hasta el punto donde se navega) ilimitado. En 1969 se da a conocer el espectro *JONSWAP* que describe aguas de una profundidad finita y de *fetch* limitado(Fossen, 1994). Este último se ha usado para describir el comportamiento del oleaje generado por el viento en las zonas donde se utiliza el *HRC-AUV* (Valeriano, 2013*a*).

1.4. Filtrado del oleaje.

La acción del filtrado de las mediciones es muy importante debido a que las perturbaciones generan ruidos en la medición. Para el sistema de control de la nave el procesar los datos directamente sin un adecuado filtrado puede constituir un gran problema. Ejemplo de ello puede ser el desgaste físico de los actuadores conjunto con un gasto de energía para accionarlos o simplemente pudiera conducir el sistema a la inestabilidad. Además, es necesario eliminar de las mediciones las oscilaciones que provoca el oleaje, antes de que estas sean empleadas en los lazos de control de los movimientos del vehículo.

1.4.1. Métodos convencionales

El oleaje es una de las principales perturbaciones que influyen en la lectura de los sensores. Para contrarrestar este problema, los primeros vehículos aprovechaban el fenómeno de la banda muerta que producía un efecto similar al del filtrado ya que le daba una entrada nula al controlador hasta que la medición entraba en rango. Este filtro genera una señal de control únicamente cuando la diferencia o el error de la posición deseada (η_d) y de la medición real (η) no se encuentre en el rango definido por la banda muerta; mostrado en la figura 1–7.



Figura 1–7: Filtrado utilizando la banda muerta.

La banda muerta podía ser regulada y conocida también como *weather* (clima en español) ya que lo ajustaban con el cambio del clima (Fossen, 2009). Estos tenían una desventaja: no permitían maniobras bruscas ni acciones fuertes sobre el control ya que ignoraba las mediciones que estuvieran en esa banda. Esta técnica tiene además la desventaja de que elimina los movimientos de baja frecuencia de pequeña amplitud, por lo que afecta la exactitud en la lectura. Se recomiendan técnicas de filtrado con mejores resultados (Fossen, 1994).

El filtro paso bajo permite el paso de la señal que tenga un valor de frecuencia más bajo que la frecuencia de corte y rechaza la señal con su valor de frecuencia mayor que la de corte. Si el ancho de banda del sistema resulta ser suficientemente pequeño, los movimientos de alta frecuencia del timón pueden ser eliminados con un filtro paso bajo de primer orden. Para los vehículos marinos pequeños esta condición resulta difícil de satisfacer, no siendo el caso para naves de gran tamaño (Fossen, 1994). El uso del filtro paso bajo tiene desventajas en su uso: le adiciona retardo de fase al sistema, aumentándolo más a medida que incrementa el orden del filtro; y puede presentar dificultades si la frecuencia del sistema y la frecuencia de la perturbación tienen magnitudes similares debido a que filtraría muy poca señal o ninguna. Una solución también puede ser el uso de filtros de orden superior, por ejemplo, uno de Butterworth de cuarto orden o varios filtros en cascada.

Otra alternativa a emplear en estos casos es el uso de filtros supresores de banda (Fossen, 1994). El filtro supresor de banda (*notch filter* en inglés) es un filtro que permite el paso de la señal exceptuando la especificada en su rango de acción. La bibliografía consultada sugiere el uso de los filtros paso bajo en cascada con los filtros *notch* como un caso especial de los supresores. Con el objetivo de restringir más frecuencias se colocan estos dos filtros en cascada, sin embargo, hay que tener en cuenta que estas configuraciones restringen la acción de control ya que acumula los retardos de ambos componentes como se muestra en

la figura 1–8. En algunos casos puede llegar a provocar la inestabilidad en el sistema (Liu, 2015).



Figura 1–8: Retardo de fase añadido por filtro paso bajo y supresor de banda configurados en cascada.

1.4.2. Observadores de estado

Un método muy usado en la actualidad son los observadores de estado (Zamora, 2010). Los observadores o estimadores de estado son una variante avanzada en el filtrado del oleaje y están diseñados en base al modelo del sistema; su función principal es estimar los componentes de baja frecuencia (los estados que indican el movimiento del vehículo) los cuales son obtenidos a partir de la señal de mando y la medición de los sensores. Los observadores de estado permiten aproximar el estado o variables del sistema, pudiendo obtener la medición filtrada. Esta estimación resultante es la señal utilizada como retroalimentación en el control en lazo cerrado del vehículo. El uso de los observadores como técnica de filtrado se ha extendido como uno de los métodos más usados. Tienen un diseño robusto con respecto a las variaciones en los modelos utilizados y ante cambios en las condiciones de operación. Además, no agregan retardo de fase al sistema a diferencia de los filtros utilizados en cascadas, permitiendo una mayor velocidad de respuesta y siendo factible para estrictos requerimientos de trabajo en tiempo real. El observador de estado al estar diseñado en base al modelo del sistema presenta bajo margen de diferencia o error (Chen, 1998). En general cuenta con una estructura simple, fácil de implementar, configurar y de sintonizar. Su estructura es similar al modelo del sistema o planta, pero con la adición de un vector de ganancias Ke pudiéndose identificar en la figura 1–9. El vector Ke puede ser calculado de distintas maneras, entre las más empleadas: ubicación de polos, ecuaciones de Kalman, teoría de pasividad de Lyapunouv y métodos de optimización. El comportamiento de un observador de estados es descrito mediante dos ecuaciones:

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}(t)\hat{\boldsymbol{x}}(t) + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{K}(t)(\boldsymbol{y}(t) - \hat{\boldsymbol{y}}(t))$$
(1.3)

$$\hat{y}(t) = \boldsymbol{C}(t)\hat{\boldsymbol{x}}(t) \tag{1.4}$$

Donde:



Figura 1–9: Estructura de un observador de estado.

- $\hat{\boldsymbol{x}}(t)$ es el vector de estados del observador
- $\hat{y}(t)$ es la salida estimada por el observador
- y(t) es la medición real
- u(t) es la entrada al observador
- $\bullet~{\bf A}$ es la matriz de transición de estados del sistema
- $\bullet~{\bf B}$ es la matriz de entradas
- C es la matriz de medición
- $\bullet~{\bf K}$ es el vector de ganancias del observador

Para los observadores de estado se han realizado numerosas investigaciones tanto para modelos lineales como no lineales. Para modelos lineales sobresalen las publicaciones del profesor Thor I. Fossen en Noruega, implementando observadores pasivos para distintos vehículos (Fossen, 2011). En la búsqueda de alternativas para maniobras complejas que requieren una mayor exactitud y al mismo tiempo filtrar el oleaje se han desarrollado diseños más avanzados de observadores pasivos pero utilizando modelos no lineales de la planta (Fossen, 1999), donde se utiliza la teoría de pasividad de Lyapunov para determinar la ganancia de los términos de corrección.

Una estrategia que en los últimos años ha despertado el interés en la comunidad científica son los observadores de ganancia ajustable (Deng, 2019)(Wang, 2015). Estos permiten actualizar las ganancias del observador al mismo tiempo que filtra, ganando el diseño en robustez y desempeño. El empleo de esta estrategia para filtrar perturbaciones en los vehículos autónomos ha tenido resultados satisfactorios en algunas investigaciones (Liu, 2017).

Una alternativa en el filtrado de las olas es el Filtro de Kalman (FK) con el cual se pueden utilizar medidas de los múltiples sensores con diversos niveles de exactitud para producir las estimaciones necesarias (Park, 2019) (Yazdkhasti, 2018). Fue introducido en el año 1960 teniendo gran aceptación y uso del mismo. Su funcionamiento puede ser comparado con un filtro promediante que presenta mayor peso en algunos datos más que en otros. El FK es un algoritmo que requiere de una capacidad de procesamiento mayor que los observadores pasivos. También para su ajuste y puesta en marcha requiere de información estadística relacionada con la precisión de los sensores, aumentando la complejidad de su diseño. Esto complica el proceso de la construcción del mismo, no obstante se han obtenido buenos resultados filtrando el oleaje con este método (Balchen, 1976). Otra desventaja adicional es que puede sufrir de singularidades matemáticas para ciertas configuraciones. A la hora del diseño el filtro de Kalman difiere al observador pasivo en cuanto a la manera en que se calcula su vector de ganancias.

1.5. Consideraciones finales del capítulo.

Conociendo que para el filtrado de las perturbaciones en los vehículos marinos pueden ser empleadas diversas estrategias; se arriba a la conclusión de que en el vehículo HRC-AUV no resulta conveniente usar los métodos de zona muerta ni de paso bajo convencional debido a que estos a pesar de tener una fácil implementación, los resultados obtenidos no son adecuados, incumpliendo los objetivos establecidos para el proyecto del HRC-AUV. Para ello, son usados métodos más avanzados: los observadores de estados. Estas nuevas estrategias garantizan un mejor filtrado. Algunas ya se encuentran diseñadas en el Simulink de Matlab para el HRC-AUV como resultado de otras investigaciones, requiriendo en este entorno gran capacidad de cómputo para su ejecución. Por lo tanto, se pretende implementar en lenguaje C estas estrategias existentes, para que luego puedan ser integradas en los hardware de bajo costo dsPIC y FPGA. También se propone el diseño de un observador no lineal de 3 GDL para el control del vehículo en el plano horizontal. Como base para las implementaciones se cuenta en el Simulink de Matlab con el diseño de un observador lineal continuo para controlar el rumbo y de otro para el control de la profundidad. Además se tiene el modelo dinámico de 6 GDL del vehículo y dos sub-sistemas, uno para el control lateral y otro para el longitudinal. Las implementaciones son descritas en el capítulo 2 y 3 de la tesis.

Capítulo 2 IMPLEMENTACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE FILTRADO DE LAS PERTURBACIONES

2.1. Introducción

Comienza el presente capítulo con una explicación de los sistemas de coordenadas empleados en el *HRC-AUV*, así como la definición de la nomenclatura y las variables empleadas para representar sus movimientos. Seguidamente, se muestra el modelo dinámico general para los vehículos marinos y se definen los modelos simplificados utilizados en los observadores de estado. De igual manera, se detalla un modelo simplificado para representar la perturbación de oleaje. Luego se explica el diseño utilizado por los observadores de rumbo y de profundidad dando lugar a la obtención de las ecuaciones discretas utilizadas en la implementación. Por último, se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en Matlab.

2.2. Nomenclatura y sistema de coorderandas empleado

La obtención del modelo dinámico es una de las tareas de más importancia para el funcionamiento correcto de los diseños realizados para un vehículo en particular. El modelado matemático no es más que la representación del vehículo mediante un conjunto de ecuaciones tratando de que tengan un comportamiento lo más cercano posible a la realidad. Para ello se realiza un profundo estudio de las características estáticas y dinámicas del vehículo. Las estáticas se refieren a cuando el cuerpo se encuentra en estado de reposo o en movimiento a una velocidad constante; mientras que las dinámicas abarcan el comportamiento del cuerpo cuando este presenta una aceleración diferente de cero. Las bases científicas para el proceso de modelado fueron dadas por *Isaac Newton* en el siglo XVII.

El movimiento de un AUV puede ser representado matemáticamente y es considerado como un cuerpo sólido y rígido. Este utiliza 6 GDL, correspondientes a las 6 coordenadas independientes que se requieren para determinar la posición, la velocidad y la orientación del vehículo.

Para el análisis de los vehículos que operan en el mar existen dos sistemas de coordenadas $(OB \ y \ OC)$ mostrados en la figura 2–1. Por conveniencia se fija el sistema de coordenadas en movimiento al cuerpo del vehículo (OB), al que se le define como sistema fijo al cuerpo

(en inglés, body fixed). El origen de este sistema se suele tomar tal que coincida con el centro de gravedad (CG) del vehículo. Los ejes del cuerpo (X_B, Y_B, Z_B) coinciden con los ejes de inercia, definidos a continuación:

- X_B eje longitudinal (desde popa a proa, hacia delante)
- Y_B eje transversal (orientado desde izquierda, hacia la derecha)
- Z_B eje normal o perpendicular (de arriba hacia abajo)



Figura 2–1: Sistema de coordenadas OB y OE. Definición de ángulos y velocidades.

Las aceleraciones a las que es sometido un punto en la tierra debido al movimiento terrestre son despreciables con respecto a las aceleraciones que es sometido un AUV que navega a bajas velocidades (Fossen, 1994). Debido a este fenómeno se utiliza también un sistema de coordenadas (OE) fijo a la superficie de la Tierra como sistema inercial, con ejes X_E, Y_E, Z_E . El sistema OE es utilizado para describir la posición y la orientación del vehículo; mientras que el OB describe las velocidades lineales y angulares. En la tesis (SNAME, 1950) es definida la nomenclatura utilizada para representar el movimiento de los vehículos submarinos; esta se resume en la tabla 2–1.

Tabla 2–1: Notación usada para los AUVs.

Traslación	Fuerza	Velocidad Lineal	Posición
Avance	Х	u	x
Desplazamiento Lateral	Υ	v	y
Arfada	Υ	w	z
Rotación	Momento	Velocidad Angular	Ángulo
Balanceo	Κ	p	ϕ
Cabeceo	М	q	θ
Guiñada	Ν	r	ψ

El movimiento general de los vehículos marinos en los 6 grados de libertad se representa mediante los siguientes vectores (SNAME, 1950):

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_1 \\ \boldsymbol{\eta}_2 \end{bmatrix} \quad donde \quad \begin{array}{c} \boldsymbol{\eta}_1 = \begin{bmatrix} x, & y, & z \end{bmatrix}^T \\ \boldsymbol{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \phi, & \theta, & \psi \end{bmatrix}^T \end{array}$$
(2.1)

$$\boldsymbol{\nu} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_1 \\ \boldsymbol{\nu}_2 \end{bmatrix} \quad donde \quad \begin{bmatrix} u, & v, & w \end{bmatrix}^T \\ \boldsymbol{\nu}_2 = \begin{bmatrix} p, & q, & r \end{bmatrix}^T$$
(2.2)

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

Siendo η el vector que denota la posición y orientación del vehículo con coordenadas en el sistema de referencia OE, ν representa el vector de velocidades lineales y angulares con coordenadas fijadas en el sistema OB y τ el vector para representar las fuerzas y momentos que se ejercen sobre el vehículo.

El trayecto del vehículo relativo al sistema OE se obtiene con la transformación de la velocidad mediante los ángulos de Euler como (Fossen, 2006):

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

donde la matriz de transformación $J(\eta)$ se define como:

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix}$$
(2.5)

para:

$$\boldsymbol{J_1(\eta_2)} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & (c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi) & (s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta) \\ s\psi c\theta & (c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi) & (s\theta s\psi c\phi - c\psi s\phi) \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{y} \quad \boldsymbol{J_2(\eta_2)} = \begin{bmatrix} 1 & t\theta s\phi & t\theta c\phi \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix}$$
(2.6)

Tener en cuenta que: c*=cos(*), s*=sen(*), t* = tan(*); $\theta \neq \frac{\pi}{2}$

2.3. Ecuaciones dinámicas del vehículo

Las ecuaciones que describen el movimiento tridimensional de los vehículos subacuáticos para sus 6 GDL son determinadas a partir de las leyes de conservación de los momentos lineales y angulares (Fjellstad, 1994). En (Fossen, 1994) se aplica la segunda ley de Newton, pudiéndose expresar la ecuación 2.7 para cualquier vehículo subacuático que tenga fijado al cuerpo un sistema de coordenadas (Valeriano, 2013*b*):

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + \tau_{olas} + \tau_{corr}$$
(2.7)

donde:

- $M = M_{RB} + M_A$ es la matriz de inercias que incluye las masas añadidas
- $C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu)$ es la matriz de Coriolis que incluye las masas añadidas
- $\mathbf{D}(\boldsymbol{\nu})$ es la matriz de amortiguamiento
- $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ es el vector de las fuerzas y momentos de gravitación/flotabilidad
- $\boldsymbol{\tau} = \left[\tau_x, \tau_Y, \tau_Z, \tau_K, \tau_M, \tau_N\right]^T$ es el vector que contiene las entradas de control
- $\tau_{olas} = \left[\tau_{X_{olas}}, \tau_{Y_{olas}}, \tau_{Z_{olas}}, \tau_{M_{olas}}, \tau_{N_{olas}}\right]^{T}$ es el vector de que representa los momentos y fuerzas debidos a los efectos de las olas.
- $\boldsymbol{\tau_{corr}} = \begin{bmatrix} \tau_{X_{corr}}, \tau_{Y_{corr}}, \tau_{Z_{corr}}, \tau_{K_{corr}}, \tau_{N_{corr}} \end{bmatrix}^T$ es el vector de que representa los momentos y fuerzas debidos a los efectos de las corrientes marinas.

Los términos que componen estas matrices son mostrados en (Valeriano, 2013b), así como la obtención de sus valores numéricos determinados utilizando la estructura del vehículo y una serie de experimentos con este. Los valores numéricos a utilizar por los observadores en las simulaciones son mostrados más adelante en la tesis.

2.4. Modelo lineal de las olas

Resulta de conveniencia contar con una aproximación lineal del espectro del oleaje debido a la simplicidad y aplicabilidad de la misma. Para ello en (Balchen, 1976) se realiza una aproximación lineal al fenómeno del oleaje; luego perfeccionada en (Balchen, 1980). Esta aproximación responde al modelo de la ecuación 2.8. La misma ha sido muy utilizada y aún en la actualidad se emplea en muchas investigaciones (Valeriano, 2018)(Hassani, 2015):

$$y(s) = \frac{K_{olas}s}{s^2 + 2\zeta w_0 s + w_0^2} w_{olas}(s) \quad ; donde \quad K_{olas} = 2\zeta w_0 \sigma_w \tag{2.8}$$

La variable σ_w es una constante que describe la intensidad de las olas, ζ es el coeficiente de amortiguamiento generalmente elegido con valor 0,1 (Valeriano, 2013*a*), w_0 la frecuencia dominante de las olas y $w_{olas}(s)$ es un ruido blanco gaussiano.

Un aspecto a tener en cuenta, es que la frecuencia fundamental del oleaje (w_0) no siempre coincide con la frecuencia de encuentro oleaje-vehículo. Esto ocurre debido a que el vehículo puede encontrarse en movimiento, provocando que el impacto con las olas tenga una frecuencia de encuentro que depende de su velocidad y orientación. El valor de frecuencia del oleaje es alterado según la expresión (Faltinsen, 2005) (Fossen, 2002):

$$w_e = w_0 - \frac{w_0^2}{g} U \cos(B_e)$$
 (2.9)

donde:

- w_e es la frecuencia de encuentro (rad/s)
- w_0 es la frecuencia dominante de la ola (rad/s)
- B_e es el ángulo que forma de dirección del vehículo con respecto a la dirección de las olas (rad) tomando como 0° la dirección del vehículo
- U es la velocidad (m/s)
- g es la gravedad (m/s^2)

Se reescribe la ecuación 2.8 considerando la frecuencia de encuentro (w_e) , resultando la ecuación 2.10:

$$y(s) = \frac{K_{olas}s}{s^2 + 2\zeta w_e s + w_e^2} w_{olas}(s) \quad ; siendo \quad K_{olas} = 2\zeta w_e \sigma_w \tag{2.10}$$

Que mostrada en el dominio del tiempo queda de la forma:

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_e \dot{y}(t) + w_e^2 y(t) = K_{olas} \dot{w}_{olas}(t)$$
(2.11)

A partir de la ecuación 2.11 se obtiene la representación en el modelo de espacios de estado, definiendo las variables de estado: $\dot{x}_{olas1} = x_{olas2}$ y $\dot{x}_{olas2} = y_{olas}$, quedando:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{olas1} \\ \dot{x}_{olas2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -w_e^2 & -2\zeta\omega_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{olas1} \\ x_{olas2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_{olas} \end{bmatrix} w_{olas}$$
(2.12)

Por su simplicidad este modelo es altamente aplicable en el diseño de sistemas de control y es el modelo del oleaje que se utiliza en el *HRC-AUV* para diseñar los observadores del oleaje.

2.5. Observador del oleaje para el control de dirección

El diseño del observador está estrechamente vinculado con el sistema que se quiere controlar, debido a que este lo contiene en su estructura. Esto hace que a la hora de diseñarlos, resulte imprescindible considerar tanto la estructura en la planta como en las perturbaciones que intervienen. Muchos autores han buscado alternativas de modelos de órdenes reducidos para ser utilizadas por los diseñadores de control. En (García, 2014) se toma el modelo de Nomoto (Nomoto, 1957) para representar el movimiento a bajas frecuencias del vehículo, utilizando este para el diseño del observador de estados de la variable rumbo. La función de transferencia que describe al modelo es mostrada mediante la ecuación 2.13

$$\frac{\psi(s)}{\delta_T(s)} = \frac{K}{Ts^2 + s} \tag{2.13}$$

Luego las ecuaciones de estado que describen al modelo Nomoto son:

$$\dot{\psi}_{BF} = r_{BF} \tag{2.14}$$

$$\dot{r}_{BF} = -\frac{1}{T}r_{BF} + \frac{K}{T}\delta_T \tag{2.15}$$

Notar que r_{BF} es la razón de cambio del ángulo de rumbo. Luego el modelo espacio estado queda representado como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_{BF} \\ \dot{r}_{BF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{BF} \\ r_{BF} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{bmatrix} \delta_T$$
(2.16)

En la práctica para encontrar el valor de la ganancia y el de la constante de tiempo se puede calcular mediante las ecuaciones 2.14 y 2.15, o directamente por medio de identificación experimental. La obtención de estos parámetros fue realizada mediante la identificación experimental; se colocó el vehículo en el mar con la configuración en lazo abierto, aplicando variaciones de tipo paso al timón del rumbo de la nave y a su vez registrando la razón de cambio del ángulo de rumbo (en lugar del propio ángulo) (Rodríguez, 2011). Estos valores fueron utilizados con la herramienta de identificación de sistemas de Matlab (*ident*) para la determinación de los parámetros, obteniendo un valor de ganancia K=0.14 y constante de tiempo T=4s (Valeriano, 2013*b*).

2.5.1. Ecuaciones del observador de rumbo

La dinámica del movimiento de los vehículos marinos puede ser determinada mediante el principio de superposición lineal. Se divide el sistema en dos componentes: BF y AF(García, 2014). Con esta afirmación y además teniendo en cuenta las ecuaciones 2.16 y 2.12; se definen las ecuaciones en el dominio del tiempo empleadas en el diseño del observador de rumbo:

$$\dot{\psi}_{BF} = r_{BF} \tag{2.17}$$

$$\dot{r}_{BF} = -\frac{1}{T}r_{BF} + \frac{K}{T}\delta_T \tag{2.18}$$

$$\dot{\xi}_{\psi} = \psi_{olas} \tag{2.19}$$

$$\dot{\psi}_{olas} = -2\zeta\omega_e\psi_{olas} - w_e^2\xi_\psi + K_{olas}w_{olas}$$
(2.20)

Las ecuaciones 2.17 y 2.18 representan los componentes de baja frecuencia del vehículo, añadidos por el modelo de Nomoto. Los componentes de ruido o de alta frecuencia debido al oleaje son representados mediante las ecuaciones 2.19 y 2.20. Los términos $\dot{\psi}_{BF}$ y \dot{r}_{BF} son los estados de baja frecuencia, el término $\dot{\psi}_{olas}$ es el estado de alta frecuencia agregado directamente por el oleaje a la medición de rumbo, y ξ es otro estado de alta frecuencia introducido para la representación en su espacio estado del sistema de segundo orden. En la figura 2–2 es mostrada mediante bloques la estructura utilizada por el observador de rumbo.



Figura 2–2: Modelos en el observador de rumbo.

Una vez agrupadas las ecuaciones del modelo de rumbo con las del oleaje, es necesario la adición de un término de corrección (vector de ganancias K_{ψ}) a estas ecuaciones para completar a la estructura del observador:

$$\dot{\hat{\psi}}_{BF} = \hat{r}_{BF} + K_{\psi 1} \tilde{\psi}$$
(2.21)

$$\dot{\hat{r}}_{BF} = -\frac{1}{T}\hat{r}_{BF} + \frac{K}{T}\delta_T + K_{\psi 2}\tilde{\psi}$$
(2.22)

$$\hat{\xi}_{\psi} = \hat{\psi}_{olas} + K_{\psi 3} \tilde{\psi}$$
(2.23)

$$\hat{\psi}_{olas} = -2\zeta\omega_e\hat{\psi}_{olas} - w_e^2\hat{\xi}_{\psi} + K_{olas}w_{olas} + K_{\psi 4}\tilde{\psi}$$
(2.24)

donde $K_{\psi i}$ (i = 1.., 4) son las ganancias del observador y $\tilde{\psi}$ es el error estimado, calculado de la siguiente manera:

$$\tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi}_{BF} - \hat{\psi}_{olas} \tag{2.25}$$

y además:

- ψ es la medición del ángulo de rumbo
- $\hat{\psi}_{BF}$ es la estimación de bajas frecuencias del ángulo de rumbo
- $\hat{\psi}_{olas}$ es la estimación del rumbo inducido por las olas

Para hallar los valores de ganancias se utiliza la función de *acker* del Matlab tomando como base el sistema y las localizaciones deseadas de los polos. En el cálculo de estas influyen valores como lo son la constante de tiempo (T) y la ganancia(K) del modelo Nomoto; la frecuencia de encuentro del oleaje (ω_e); y el coeficiente de amortiguamiento en el modelo del oleaje(ζ). El procedimiento es explicado detalladamente en García (2014).

2.5.2. Ecuaciones discretas del observador de rumbo

Para la construcción del algoritmo en lenguaje C se necesita llevar al plano Z (discretizar) las ecuaciones del observador antes mencionadas (de la 2.21 a la 2.24). En la conformación de las ecuaciones discretas, se representan los estados del observador en la matriz A_{ψ} de dimensiones 4x4; las ganancias del mando en el vector B_{ψ} de 4 columnas; y las ganancias del observador en el vector Kd_{ψ} de 4 columnas. Los valores de la matriz y los vectores mencionados son calculados en Matlab mediante el siguiente código:

$$\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{\psi}} = eye(4) + \boldsymbol{A}\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{\psi}} * Ts_{\boldsymbol{\psi}}$$

$$(2.26)$$

$$\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{\psi}} = (eye(4) * Ts_{\boldsymbol{\psi}} + \boldsymbol{A}\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{\psi}} * Ts_{\boldsymbol{\psi}}^2/2) * \boldsymbol{B}\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{\psi}}$$
(2.27)

$$Kd_{\psi} = acker(A_{\psi}, Cc_{\psi}, Pol_{\psi})$$
 (2.28)

En la tesis (García, 2014) se tienen los valores de las matrices que definen los estados que del observador continuo Ac_{ψ} , Bc_{ψ} y Cc_{ψ} . En la misma también se calcula la variable Pol_{ψ} que representa los polos a utilizar por el método de Ackerman. El valor de Ts_{ψ} indica el tiempo de muestreo a utilizar por el observador.

La representación del observador en el plano Z queda expresada:

$$\hat{\psi}_{BF(z)} = \psi_{BF(z-1)} + A_{\psi 12} \hat{r}_{BF(z-1)} + B_{\psi 1} \delta_{T(z)} + K_{d\psi 1} \tilde{\psi}_{(z)}$$
(2.29)

$$\hat{r}_{BF(z)} = -A_{\psi 22}\hat{r}_{BF(z-1)} + B_{\psi 2}\delta_{T(z)} + K_{d\psi 2}\tilde{\psi}_{(z)}$$
(2.30)

$$\hat{\xi}_{\psi(z)} = \hat{\xi}_{\psi(z-1)} + A_{\psi 34} \hat{\psi}_{olas(z-1)} + K_{d\psi 3} \tilde{\psi}_{(z)}$$
(2.31)

$$\hat{\psi}_{olas(z)} = -A_{\psi 43} w_e^2 \hat{\xi}_{\psi(z-1)} - A_{\psi 44} 2\zeta \omega_e \hat{\psi}_{olas(z-1)} + K_{olas} w_{olas(z)} + K_{d\psi 4} \tilde{\psi}_{(z)} \quad (2.32)$$

y el error estimado $(\psi_{(z)})$:

$$\tilde{\psi}_{(z)} = \psi_{(z)} - \hat{\psi}_{BF(z-1)} - \hat{\psi}_{olas(z-1)}$$
(2.33)

Una vez definidas las ecuaciones discretas, son utilizadas como base para la construcción del algoritmo correspondiente al observador de rumbo.

2.5.3. Resultados de la implementación del observador de rumbo

Para las simulaciones realizadas se incluyeron esquemas de control previamente diseñados como resultados de otras investigaciones realizadas en el GARP. Se utilizó el modelo de simulación de 6 GDL del vehículo con la finalidad de utilizarlo como referencia y generar

las señales necesarias (medición) como entrada a los observadores. Este modelo incluye toda la información de la dinámica del vehículo y de los disturbios que lo afectan. Como controlador se utilizó un *PI-D* con ganancias $K_p=1.5$, $K_i=0.01$ $K_d=1$. Los parámetros del modelo de baja frecuencia son K=0,14 y T=4. Además la frecuencia fundamental de las olas se fijó a $w_0=1.5$ rad/s. En la literatura se recomienda escoger $0.5 \le \sigma \le 0.7$ y $0.01 \le \zeta \le 0.1$; tomando para simular $\sigma=0.5$ y $\zeta=0.1$. La velocidad del vehículo en el eje transversal es pequeña, pudiéndose aproximar la velocidad total del vehículo como U $= \sqrt{u^2 + v^2} \approx u$, en el caso del *HRC-AUV* es igual a 1,9 m/s (García, 2014). El valor máximo de la frecuencia de encuentro será

$$\omega_e = |1, 5 - 1, 5^2(\frac{1, 9}{10}) \cos 180^\circ| = 1,9275$$
(2.34)

La frecuencia natural de las olas $\omega_0=1,5$ rad/s sería $T_0=4,1867$ s y para $\omega_e=1,9275$ rad/s el valor de $T_e=5,85$ s. Estos valores corresponden con una simulación de la altura de las olas en el rango entre 0 y 0.7 m lo que equivale a los estados del mar 1,2 y 3 según la escala de Douglas, suavizado ligero y con pequeñas crestas (Faltinsen, 2005). El código del observador implementado en C incluye los tiempos de muestreo de $T_s = 1, 0.1, 0.01$ y 0.02, pero en este caso se utiliza un tiempo de muestreo de $T_s = 0,1$ s.

$$\begin{bmatrix} \psi_{BF(z)} \\ r_{BF(z)} \\ \xi_{\psi(z)} \\ \psi_{olas(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0,10 & 0 & 0 \\ 0 & 0,975 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,10 \\ 0 & 0 & -0,225 & 0,97 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{BF(z-1)} \\ r_{BF(z-1)} \\ \xi_{\psi(z-1)} \\ \psi_{olas(z-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0001 \\ 0,0034 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_{T(z)} + \begin{bmatrix} 13,199 \\ 5,9149 \\ -1,5382 \\ -11,177 \end{bmatrix} \tilde{\psi}_{(z)}$$

$$(2.35)$$

$$; \tilde{\psi}_{(z)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{BF(z)} \\ \xi_{\psi(z)} \\ \psi_{olas(z)} \end{bmatrix}$$
(2.36)

Para la simulación se utiliza el observador con los parámetros mostrados en la ecuación 2.35 y además se incluye un estimador continuo resultante de otras investigaciones. Se realiza a lazo cerrado y se le aplica a la entrada un paso de amplitud 10° en t=0 s. Luego se le vuelve aplicar otro paso de amplitud 40° para un t=40 s. En la figura 2–3 se aprecia la medición real con respecto a la salida del observador continuo y del implementado, notando que se estabiliza en $\psi = 50^{\circ}$. Por otra parte en la figura 2–4 se muestra la razón de cambio del ángulo de rumbo y en las figuras 2–5 y 2–6 se muestra la diferencia entre la salida real del sistema y estimación realizada por el observador implementado.



Figura 2-3: Comportamiento de las estimaciones del rumbo.





El observador de rumbo implementado en cuanto a los estados rumbo (ψ_{BF}) y razón de cambio de este (r_{BF}) tiene una respuesta aproximada al observador continuo, estimando de una manera precisa los estados del sistema. El módulo del error en la variable de rumbo oscila entre 0° y 2°, teniendo un pico de \approx 6° para t=40 s debido a una brusca variación en la entrada del sistema. Esto ocurre de igual manera en la razón de cambio de rumbo, pero nunca excediendo el error de 0.3 (°/s).



En la figura 2–7 se muestra el impacto directo del observador sobre la señal de mando, lo cual constituye la finalidad del mismo, reducir vibraciones en el sistema mediante la compensación de la señal de mando.



Finalmente en la tabla 2-2 se muestran los valores estadísticos correspondientes a las señales mostradas en la figura 2-7 desde T=60 s en adelante.

Tabla 2–2: Valores estadísticos de la señal de mando en lazo cerrado.

	Controlando sin observador	Controlando con observador
Media(°)	-0.3343	0.08319
Desviación estándar(°)	2.775	1.314

Con estos valores se valida la implementación realizada del observador de rumbo. Estos demuestran lo acertado del diseño ya que trae consigo una reducción considerable de la desviación de la señal de mando, y a la vez dando como resultado un menor consumo de energía y una disminución del desgaste sistemático del actuador del rumbo.

2.6. Observador del oleaje para el control en el plano vertical

Para representar el movimiento a bajas frecuencias del HRC-AUV del plano vertical se auxilia del subsistema longitudinal construido a partir de una linealización sobre el punto de operación sobre el modelo dinámico de 6 GDL (Valeriano, 2013b). Este subsistema longitudinal puede ser representado mediante dos funciones de transferencias:

Función de transferencia que relaciona el ángulo del timón de profundidad (δ_E) y cabeceo del vehículo (θ) :

$$\frac{\theta(s)_{BF}}{\delta_E(s)} = \frac{b_4}{(I_{yy} - M_{\dot{q}})s^2 - M_q s + WBG_z}$$
(2.37)

Función de transferencia que relaciona ángulo de cabeceo(θ) y la profundidad(z).

$$\frac{z(s)_{BF}}{\theta(s)_{BF}} = \frac{-u_0}{s} \tag{2.38}$$

La representación dinámica del modelo en espacio estado que responde a las funciones de transferencias mostradas en la Ecuaciones 2.37 y 2.38 queda:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{BF} \\ \dot{\theta}_{BF} \\ \dot{q}_{BF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -u_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{WBG_z}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} & \frac{M_q}{Y_{yy} - M_{\dot{q}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{BF} \\ \theta_{BF} \\ q_{BF} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{b_4}{I_{yy} - M_{\dot{q}}} \end{bmatrix} \delta_E$$
(2.39)

Donde b_4 , M_q , $M_{\dot{q}}$ corresponden con la ganancia de actuadores, el término de arrastre lineal y el término de masas añadidas respectivamente. Estos parámetros fueron identificados, pudiendo determinarse sus valores los cuales son mostrados en la siguiente sección.

2.6.1. Ecuaciones del observador de profundidad

Para el diseño del observador de profundidad se procede de manera similar al observador de rumbo. Para ello se divide la dinámica del sistema en los dos componentes $(BF \ y \ AF)$, tomando para las bajas frecuencias el modelo de profundidad antes expuesto y para las altas frecuencias el del oleaje. Dicho esto, las ecuaciones en el dominio del tiempo, base para el diseño del observador de profundidad son:

$$\dot{\hat{z}}_{BF} = -u_0 \hat{\theta}_{BF} \tag{2.40}$$

$$\hat{\theta}_{BF} = \hat{q}_{BF} \tag{2.41}$$

$$\hat{q}_{BF} = b_1 \hat{\theta}_{BF} + c_1 \hat{q}_{BF} + d_1 \delta_E \tag{2.42}$$

$$\hat{\xi}_{AF} = \hat{z}_{olas} \tag{2.43}$$

$$\dot{\hat{z}}_{olas} = -w_e^2 \hat{\xi}_{AF} - 2\zeta \omega_e \hat{z}_{olas} + K_{olas} w_{olas}$$
(2.44)

Las ecuaciones de la 2.40 a la 2.42 responden a los términos de baja frecuencia del vehículo, añadidos a través del modelo de profundidad; siendo estos términos, la profundidad (\hat{z}_{BF}) , el ángulo de cabeceo $(\hat{\theta}_{BF})$, y la razón de cambio del ángulo de cabeceo (\hat{q}_{BF}) . Los componentes de alta frecuencia producidos por el oleaje son insertados por medio de las ecuaciones 2.43 y 2.44: \hat{z}_{olas} es el estado de alta frecuencia agregado directamente por el oleaje en la medición de profundidad y $\hat{\xi}_{AF}$ es el otro estado de alta frecuencia introducido para la representación en su espacio estado del sistema de segundo orden. En la figura 2–8 se muestra la estructura que compone al observador de profundidad. Las constantes del observador mostradas en la figura son definidas mas adelante.



Figura 2-8: Modelos en el observador de profundidad.

Al igual que el procedimiento seguido con el observador de rumbo, se le añade un vector de ganancias (\mathbf{K}_z) a las ecuaciones:

$$\dot{\hat{z}}_{BF} = -u_0\hat{\theta}_{BF} + K_{z1}\tilde{z} \tag{2.45}$$

$$\hat{\theta}_{BF} = \hat{q}_{BF} + K_{z2}\tilde{z} \tag{2.46}$$

$$\dot{\hat{q}}_{BF} = b_1 \hat{\theta}_{BF} + c_1 \hat{q}_{BF} + d_1 \delta_E + K_{z3} \tilde{z}$$
(2.47)

$$\hat{\xi}_{AF} = \hat{z}_{olas} + K_{z4}\tilde{z} \tag{2.48}$$

$$\dot{\hat{z}}_{olas} = -w_e^2 \hat{\xi}_{AF} - 2\zeta \omega_e \hat{z}_{olas} + K_{olas} w_{olas} + K_{z5} \tilde{z}$$
(2.49)

Donde K_{zi} (i = 1.., 5) son las ganancias del observador, mientras que \tilde{z} es el error estimado, y es calculado de la siguiente manera:

$$\tilde{z} = z - \hat{z}_{BF} - \hat{z}_{olas} \tag{2.50}$$

para:

- z es la medición del ángulo de rumbo
- \hat{z}_{BF} es la estimación de bajas frecuencias del ángulo de rumbo

• \hat{z}_{olas} es la estimación del rumbo inducido por las olas

y las constantes:

$$b_1 = -\frac{WBG_z}{I_{yy} - M_{\dot{q}}}; \quad c_1 = \frac{M_q}{I_{yy} - M_{\dot{q}}}; \quad d_1 = \frac{b_4}{I_{yy} - M_{\dot{q}}}$$
(2.51)

Para el cálculo de las ganancias del observador $K_{iz}(i = 1.., 5)$ se procede de igual manera que se realizó con el observador de rumbo. Los pasos son similares, pero con la diferencia de que este observador tiene 5 estados, teniendo que calcular un valor más en el vector de ganancias. Destacar que el vector de la ganancia del observador continúa dependiendo de los valores insertados por el oleaje: la frecuencia de encuentro de las olas (ω_e) y el coeficiente de amortiguamiento que presenta al modelo del oleaje(ζ).

En (García, 2014) se explica la manera de calcular los estos parámetros, además de exponer la forma correcta de ubicar los polos.

2.6.2. Ecuaciones discretas del observador de profundidad

Para la implementación del observador en el lenguaje C se llevan las ecuaciones de la 2.45 a la 2.49 al plano discreto, para luego traducirlas a código.

En la conformación de las ecuaciones discretas, se tienen los estados del observador en la matriz A_z de dimensiones 5x5; las ganancias del mando en el vector B_z de 5 columnas; y las ganancias del observador en el vector Kd_z de 5 columnas. Partiendo de los parámetros del observador continuo de profundidad, los valores del discreto son calculados en Matlab de forma similar a la que se empleó en el observador discreto de rumbo:

$$\boldsymbol{A_z} = eye(5) + \boldsymbol{Ac_z} * Ts_z \tag{2.52}$$

$$\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{z}} = (eye(5) * Ts_{\boldsymbol{z}} + \boldsymbol{A}\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{z}} * Ts_{\boldsymbol{z}}^{2}/2) * \boldsymbol{B}\boldsymbol{c}_{\boldsymbol{z}}$$
(2.53)

$$Kd_z = acker(A_z, Cc_z, Pol_z)$$
 (2.54)

Los valores de las matrices que definen los estados que del observador continuo Ac_z , Bc_z y Cc_z son calculados en la tesis (García, 2014), al igual que el valor de la variable Pol_z . El valor de Ts_z indica el tiempo de muestreo a utilizar por el observador.

El observador en el plano Z queda expresado:

$$\hat{z}_{BF(z)} = \hat{z}_{BF(z-1)} + A_{z12}\hat{\theta}_{BF(z-1)} + Kd_{z1}\tilde{z}_{(z)}$$
(2.55)

$$\hat{\theta}_{BF(z)} = \hat{\theta}_{BF(z-1)} + A_{z23}\hat{q}_{BF(z-1)} + B_{z2}\delta_{E(z)} + Kd_{z2}\tilde{z}_{(z)}$$
(2.56)

$$\hat{q}_{BF(z)} = A_{z32}\theta_{BF(z-1)} + A_{z33}\hat{q}_{BF(z-1)} + B_{z3}\delta_{E(z)} + Kd_{z3}\tilde{z}_{(z)}$$
(2.57)

$$\hat{\xi}_{AF(z)} = \hat{\xi}_{AF(z-1)} + A_{z45}\hat{z}_{olas(z-1)} + Kd_{z4}\tilde{z}_{(z)}$$
(2.58)

$$\hat{z}_{olas(z)} = -A_{z44} w_e^2 \hat{\xi}_{AF(z-1)} - A_{z45} 2\zeta \omega_e \hat{z}_{olas(z-1)} + K_{olas} w_{olas(z)} + K d_{z5} \tilde{z}_{(z)} \quad (2.59)$$

donde $\tilde{z}_{(z)}$ es el error estimado, y es calculado de la siguiente manera:

$$\tilde{z}_{(z)} = z_{(z)} - \hat{z}_{BF(z-1)} - \hat{z}_{olas(z-1)}$$
(2.60)

A partir de las ecuaciones discretas planteadas se realiza el algoritmo del código en C correspondiente al observador de profundidad.

2.6.3. Resultados de la implementación del observador de profundidad

Para la simulación en el observador de profundidad al igual que en el de rumbo se utilizan esquemas de control obtenidos como resultado de otras investigaciones. Se utilizó el sub-sistema longitudinal de 3 *GDL* para simular el comportamiento de las variables en el vehículo. Además, se utiliza una estrategia de control en cascada: un controlador proporcional en el lazo externo (controlando profundidad) con ganancia $K_{pe} = -0,0236$ y un PID para el lazo interno (controlando el ángulo de cabeceo) con ganancias $K_p = -0,1888$, $K_i = -0,035$, y $K_d = -0,743$. La frecuencia fundamental del oleaje fue fijada a 6 rad/s, y se colocaron $\sigma=0,5$ y $\zeta=0,01$. El código en C del observador incluye los tiempos de muestreo $T_s = 1$; 0.1; 0.01 y 0.02. Los parámetros fueron calculados para un $T_s = 0,02$ s. La ecuación 2.61 muestra el observador utilizado en la simulación.

$$\begin{bmatrix} \hat{z}_{BF(z)} \\ \hat{\theta}_{BF(z)} \\ \hat{q}_{BF(z)} \\ \hat{z}_{olas(z)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0,19 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0024 & 0,9751 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,0 & -0,19 \\ 0 & 0 & 0 & 1,8947 & 0,988 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z}_{BF(z-1)} \\ \hat{\theta}_{BF(z-1)} \\ \hat{z}_{AF(z-1)} \\ \hat{z}_{olas(z-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0,0003 \\ -0,0071 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_{E(z)} + \begin{bmatrix} -0,0067 \\ 0,0001 \\ -0,0001 \\ 1,5445 \\ -1,1522 \end{bmatrix} \tilde{z}_{(z)}$$

$$(2.61)$$

Además del observador implementado se incluye en la simulación un estimador continuo, existente de otras investigaciones. En el proceso se le aplica un paso de amplitud 2 metros en la señal de entrada a seguir en el instante t=0. La figura 2–9 muestra el comportamiento del sistema que se estabiliza en una profundidad de 2 metros; y también se puede apreciar el filtrado realizado tanto por el observador continuo como el implementado, teniendo valores cercanos en su estimación.



Luego las figuras 2–10 y 2–11 muestran respectivamente el comportamiento del observador en cuanto a la variación del ángulo de cabeceo y a su razón de cambio.



En las figuras 2–12, 2–13 y 2–14 se tiene el comportamiento del error (medición real - estimación) de la profundidad, del ángulo de cabeceo y la razón de cambio de este respectivamente.

Las gráficas demuestran que el observador de profundidad estima correctamente la medición, obteniendo valores muy cercanos al estimador continuo. Resulta válido destacar que el observador amortigua considerablemente la razón de cambio del ángulo de cabeceo. Esto representa un resultado positivo, ya que filtra esta señal ruidosa y mejora así el control del vehículo.







Figura 2–13: Error en el ángulo de cabeceo.



La figura 2–15 el comportamiento del mando en el control de profundidad usando como retroalimentación la medición sin filtrar y luego filtrada por el observador.



Figura 2–15: Señal de mando con observador y sin observador.

Finalmente en la tabla 2-3 se muestran los valores estadísticos correspondientes a las señales mostradas en la figura 2-15 para T=60 s en adelante.

Tabla 2–3: Valores estadísticos de la señal de mando en lazo cerrado.

	Controlando sin observador	Controlando con observador
Media(°)	0.008176	0.005303
Desviación estándar(°)	0.1539	0.01022

Los valores de la tabla 2–3 permiten la validación de la implementación del observador. Estos demuestran con datos estadísticos que la implementación del observador resulta adecuada para el *HRC-AUV*. También en la figura 2–15 se observa que en la señal de mando filtrada se reduce el comportamiento oscilatorio con respecto al mando contaminado, además existe una reducción considerable de la desviación estándar del mando al ser filtrado. Esto trae como resultado un menor consumo de energía y menor desgaste por parte del actuador de profundidad.

2.7. Consideraciones finales del capítulo

Para la implementación de los observadores tanto en el control de rumbo como el de profundidad se obtuvieron las ecuaciones discretas que describen su comportamiento. Una vez con estas se realiza el algoritmo correspondiente en C y se integran en el Simulink de Matlab por medio de los bloques *S-functions*. A pesar de que los observadores presentados fueron simulados con un T_s específico, el código elaborado incluye los tiempos de muestreo de $T_s=1, 0.1, 0.01 \text{ y } 0.02$. Las gráficas obtenidas en las simulaciones demuestran que los observadores implementados realizan una correcta estimación de los estados del sistema, teniendo un comportamiento similar a los observadores continuos existentes de otras investigaciones. Para el observador de rumbo la mayor diferencia entre la medición y el observador ocurrió para t=40 s debido a una brusca variación en la señal de entrada del sistema. El mejor resultado de estimación fue obtenido por el observador de profundidad específicamente en la variable razón de cambio del ángulo de cabeceo, donde se amortigua de manera considerable la medición ruidosa. Ambas implementaciones fueron evaluadas en base al comportamiento de la desviación estándar en la señal de mando. Estas constituyen una mejora a la hora del control, reduciendo los desgastes físicos del timón de profundidad y disminuyendo el consumo eléctrico del vehículo.

Capítulo 3 OBSERVADOR DE GANANCIAS AJUSTABLES

3.1. Introducción

Este capítulo tiene como finalidad implementar un observador no lineal de 3 GDL, utilizado para estimar y filtrar las variables de navegación del vehículo en un plano horizontal. A diferencia de los observadores del capítulo anterior, en donde solo se incorporaba 1 GDL, en este caso se utilizan ecuaciones de 3 GDL tanto para representar el movimiento del vehículo como las perturbaciones.

Consecuentemente con las ideas planteadas, en primer lugar, en el presente capítulo se define la estructura de los modelos empleados. Se define la estructura de cada matriz de ganancia del observador, en función de la frecuencia del oleaje. Este hecho permite ajustar en línea la dinámica del observador, ante cambios en el oleaje. Por último, se discuten los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en Matlab.

3.2. Modelos empleados en el observador no lineal

En el diseño de los observadores del capítulo anterior, la matriz de las ganancias se calculaba en base a una frecuencia fundamental del oleaje previamente definida. Los observadores anteriores carecen de adaptabilidad a las condiciones dinámicas de navegación. En caso de un cambio en las condiciones del mar repercute negativamente en el desempeño del filtro. Una vía factible es el empleo de observadores pasivos de ganancia ajustable. Estos algoritmos son diseñados utilizando modelos no lineales debido al comportamiento no lineal de la dinámica en los vehículos marinos. En (Belleter, 2015) consideran las perturbaciones del sistema como variables en el tiempo (no estacionarias), calculando las ganancias del observador en base a las mismas. En el presente capítulo se implementa un observador no lineal de ganancias ajustables como sistema de navegación en el plano horizontal para el HRC-AUV. Para ello se auxilia del modelo no lineal de 3 GDL que representa el movimiento del vehículo en el plano horizontal y además de representaciones matemáticas correspondientes al modelado de las olas y de las corrientes marinas. El valor de frecuencia del oleaje se considera una entrada al observador no lineal.

3.2.1. Modelo del vehículo en el plano horizontal

Con el uso de la ecuación 2.7 que representa el modelo de 6 *GDL* del vehículo y la ecuación de transformación 2.4 es posible obtener los modelos reducidos del movimiento del vehículo en los distintos planos, para usarlos en estrategias de control, guiado y diseño de observadores (Fossen, 2009). En esas ecuaciones los términos no lineales que caracterizan la dinámica del movimiento en el plano horizontal del *HRC-AUV* son de 3er orden, teniendo como variables de estado: la posición lineal (x), la posición lineal (y) y la orientación angular (ψ) agrupados en el vector de posición $\eta_3 = [x, y, \psi]^T$, así como las velocidades respectivas $\nu_3 = [u, v, r]^T$. Este modelo simplificado continúa siendo no lineal y es tomado como base para diseñar el observador que se quiere implementar. En adelante se usa el subíndice 3 para denotar la dinámica en el plano horizontal. Los componentes de $g(\eta)$ en los estados de interés en η_3 son iguales a cero por no existir movimiento en el plano vertical. Las matrices y vectores restantes que determinan el modelo no lineal del vehículo para el subsistema horizontal son definidas:

$$\boldsymbol{M_3} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$
(3.1)

$$C_{3}(\nu_{3}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv + Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & mu - X_{\dot{u}}u \\ mv - Y_{\dot{v}}v & -mu + X_{\dot{u}}u & 0 \end{bmatrix}$$
(3.2)

$$D_{3}(\nu_{3}) = -\begin{bmatrix} X_{u} + X_{u|u|} |u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v} + Y_{v|v|} |v| & 0 \\ 0 & 0 & N_{r} + N_{r|r|} |r| \end{bmatrix}$$
(3.3)

$$\mathbf{J}_{\mathbf{3}}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0\\ \sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.4)

Para el control del movimiento en el plano horizontal se utilizan como entradas al sistema la velocidad de giro del motor (n) y la deflexión angular del timón de cola (δ_T) , teniendo la forma:

$$\boldsymbol{\tau}_{3} = \begin{bmatrix} \tau_{X} \\ \tau_{Y} \\ \tau_{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1} & 0 \\ 0 & b_{2} \\ 0 & b_{5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \cdot |n| \\ \delta_{T} \end{bmatrix}$$
(3.5)

Las matrices anteriores conforman el modelo de 3 GDL del vehículo. En la tabla 3–1 se tienen los valores geométricos e inerciales, así como los obtenidos experimentalmente para el HRC usados para describir el modelo.

Parámetro	Descripción	Valor
$X_{\dot{u}}$	masa añadida	-250.84 kg
$X_{\dot{v}}$	masa añadida	$-3834 \ kg$
$N_{\dot{r}}$	masa añadida	$-15572 \ kgm^2$
b_1	ganancia de actuador	0.1946
b_2	ganancia de actuador	318.39
b_5	ganancia de actuador	1273.56
$X_u + X_{u u }$	$\operatorname{amortiguamiento}$	181.45 + 47.49u
$Y_v + Y_{v v }$	$\operatorname{amortiguamiento}$	1219.80
$N_r + N_{r r }$	$\operatorname{amortiguamiento}$	9096.90

Tabla 3–1: Parámetros físicos usados en el observador no lineal HRC-AUV.

Con los parámetros incluidos en la tabla 3–1 se sustituyen los valores numéricos de las matrices y vectores que definen el modelo:

$$\mathbf{M_3} = \begin{bmatrix} 4345,40 & 0 & 0\\ 0 & 7928,56 & 0\\ 0 & 0 & 36388 \end{bmatrix}$$
(3.6)

$$C_{3}(\nu_{3}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -7928,56\nu \\ 0 & 0 & 4535,40u \\ 7928,56\nu & -4535,40u & 0 \end{bmatrix}$$
(3.7)

$$D_{3}(\nu_{3}) = -\begin{bmatrix} 181,45+47,49u & 0 & 0\\ 0 & 1219,80 & 0\\ 0 & 0 & 9096,90 \end{bmatrix}$$
(3.8)

$$\boldsymbol{\tau_3} = \begin{bmatrix} 0,1946 & 0\\ 0 & 318,39\\ 0 & 1273,56 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \cdot |n|\\ \delta_T \end{bmatrix}$$
(3.9)

Las expresiones matemáticas que representan las perturbaciones que afectan la dinámica del vehículo son mostradas a continuación.

3.2.2. Modelo para representar el oleaje

Para incluir las perturbaciones provocadas por el oleaje, se parte de la aproximación lineal del oleaje de la ecuación 2.10, llevándolo al dominio del tiempo para representar el efecto provocado por las olas sobre el plano horizontal y obteniendo como resultado el sistema de ecuaciones:

$$\dot{\xi}_x = x_{olas} \tag{3.10}$$

$$\dot{\xi}_y = y_{olas} \tag{3.11}$$

$$\dot{\xi}_{\psi} = \psi_{olas} \tag{3.12}$$

$$\dot{x}_{olas} = -\omega_{ex}^2 \xi_x - 2\sigma \omega_{ex} x_{olas} + K_{\omega x} w_x \tag{3.13}$$

$$\dot{y}_{olas} = -\omega_{ey}^2 \xi_y - 2\sigma \omega_{ey} y_{olas} + K_{\omega y} w_y \tag{3.14}$$

$$\dot{\psi}_{olas} = -\omega_{e\psi}^2 \xi_{\psi} - 2\sigma \omega_{e\psi} \psi_{olas} + K_{\omega\psi} w_{\psi}$$
(3.15)

En las ecuaciones se ha utilizado la notación K_{ω} en lugar de K_{olas} para representar la ganancia del modelo lineal del oleaje. Los subíndices en las ecuaciones representan la incidencia de las olas afectando las variables del vector $\boldsymbol{n_{3-veh}} = [x, y, \psi]^T$, vector que representa los movimientos de baja frecuencia. Los estados del oleaje $\boldsymbol{n_{olas}} = [x_{olas}, y_{olas}, \psi_{olas}]^T$ son añadidos a las variables del movimiento en el plano horizontal aplicando el principio de superposición, representando el movimiento de alta frecuencia. Las variables que responden a el movimiento del vehículo marino estando en presencia del oleaje, cumplen con la ecuación 3.16.

$$\boldsymbol{n_3} = \boldsymbol{n_{3-veh}} + \boldsymbol{n_{olas}} = [x, y, \psi]^T + [x_{olas}, y_{olas}, \psi_{olas}]^T$$
(3.16)

Luego el sistema de ecuaciones que representa oleaje puede ser representado de forma matricial compacta como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\xi}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3x3} & \boldsymbol{I}_{3x3} \\ \boldsymbol{\Omega}_1(\omega_e) & \boldsymbol{\Omega}_2(\omega_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_1 \\ \boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3x3} \\ \boldsymbol{\Sigma} \end{bmatrix} \boldsymbol{w}$$
(3.17)

$$n_{olas} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3\mathbf{x}3} & \mathbf{I}_{3\mathbf{x}3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_1 \\ \boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{\Lambda} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\xi}_1 \\ \boldsymbol{\xi}_2 \end{bmatrix}$$
 (3.18)

donde:

- $\boldsymbol{\xi} \in \Re^{6x1} = [\boldsymbol{\xi}_1, \boldsymbol{\xi}_2]^T$
- $\xi_1 \in \Re^{3x1} = [\xi_x, \xi_y, \xi_{\psi}]^T$
- $\boldsymbol{\xi_2} \in \Re^{3x1} = [x_{olas}, y_{olas}, \psi_{olas}]^T$ $\boldsymbol{\Omega_1}(\omega_e) \in \Re^{3x3} = -diag[w_{ex}^2, w_{ey}^2, w_{e\psi}^2]$
- $\Omega_2(\omega_e) \in \Re^{3x3} = -diag[2\sigma w_{ex}, 2\sigma w_{ey}, 2\sigma w_{ey}]$
- $\Sigma \in \Re^{3x3} = diag[K_{wx}, K_{wy}, K_{w\psi}]$

•
$$\boldsymbol{w} \in \Re^{3x1} = [w_x, w_y, w_\psi]^2$$

• $\Lambda \in \Re^{3x6} = [\mathbf{0_{3x3}} \ \mathbf{I_{3x3}}]$

y la matriz de transición de los estados del oleaje $\Omega \in \Re^{6x_6} es$:

$$\boldsymbol{\Omega}(\omega_e) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3\mathbf{x}\mathbf{3}} & \mathbf{I}_{3\mathbf{x}\mathbf{3}} \\ \mathbf{\Omega}_1(\omega_e) & \mathbf{\Omega}_2(\omega_e) \end{bmatrix}$$
(3.19)

Esta última depende de la frecuencia del oleaje, posibilitando que se pueda ajustar en línea para lograr las condiciones de adaptabilidad del observador.

3.2.3. Modelo para representar las corrientes y fuerzas de deriva de las olas

En el movimiento del vehículo en el plano horizontal (x - y), las corrientes marinas que influyen son descritas solamente en función de de las velocidades inducidas por estas, o sea, solo los componentes u_c y v_c que crean una velocidad relativa respecto al vehículo. La incidencia en las velocidades puede ser mayor o menor en dependencia del ángulo de orientación que presenta el vehículo con respecto a la dirección de las olas. Existen métodos para estimar la velocidad de las corrientes marinas mejorando la acción del control (Ye, 2017)(Martinez, 2015). Otra opción es considerar las corrientes como un corrimiento en las variables de estado (Liu, 2015)(Liu, 2017)(Hassani, 2013). Esta última mencionada es la utilizada en la presente tesis. Para representar las corrientes marinas se utiliza el modelo Gauss-Markov de primer orden, mostrado en la ecuación 3.20:

$$\dot{\mathbf{b}} = -\mathbf{T}_{\mathbf{b}}\mathbf{b} \tag{3.20}$$

La matriz constante $\mathbf{T}_{\mathbf{b}} \in \Re^{3x^3}$ agrupa los términos $T_{bx}, T_{by}, T_{b\psi}$ para cada estado del modelo horizontal del vehículo. El término $\mathbf{T}_{\mathbf{b}}$ modela el efecto de las corrientes marinas y las fuerzas de deriva del oleaje. La ecuación 3.20 llevada a espacio estado en el plano horizontal es mostrada a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{b}_x \\ \dot{b}_y \\ \dot{b}_{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_{bx} & 0 & 0 \\ 0 & -1/T_{by} & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{b\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_{\psi} \end{bmatrix}$$
(3.21)

3.3. Diseño del observador de estados

Con las ecuaciones anteriormente definidas se define el modelo dinámico de 3 GDL para el movimiento en el plano horizontal del sistema de la forma:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\xi}$$
 (3.22)

$$\dot{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{3-veh}} = \boldsymbol{J}_{\boldsymbol{3}}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{\nu}_{\boldsymbol{3}}$$
(3.23)

$$\dot{\boldsymbol{b}} = -\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{b}}\boldsymbol{b} \tag{3.24}$$

$$M_{3}\dot{\nu}_{3} = \tau_{3} - C_{3}(\nu_{3})\nu_{3} - D_{3}(\nu_{3})\nu_{3} + J_{3}^{T}(\psi)\hat{b}$$
(3.25)

Siendo las salidas del modelo:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{n_3} = \boldsymbol{n_{3-veh}} + \boldsymbol{n_{olas}} \tag{3.26}$$

De igual manera que la realizada con los observadores del capítulo anterior, se utiliza la dinámica del sistema tenido como estructura base en el diseño del observador no lineal, añadiéndose además un vector de ganancias (\mathbf{K}) a este. Para la obtener la característica del observador de adaptarse a las condiciones del mar y el oleaje, los estados y las ganancias relacionadas directamente con el oleaje se han definido en función de la frecuencia de incidencia del oleaje $\hat{\omega}_e$. Dicha frecuencia se pasa como entrada al observador, pero puede ser obtenida directamente en línea mediante un estimador de frecuencia. La dinámica del observador no lineal es descrita por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\hat{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\Omega}(\hat{\omega}_e)\boldsymbol{\hat{\xi}} + \boldsymbol{K}_1(\hat{\omega}_e)\boldsymbol{\tilde{y}}$$
(3.27)

$$\dot{\hat{n}}_{3-veh} = R_3(\hat{\psi})\hat{\nu}_3 + K_2(\hat{\omega}_e)\tilde{y}$$
(3.28)

$$\hat{\boldsymbol{b}} = -T_b \hat{\boldsymbol{b}} + K_3 \tilde{\boldsymbol{y}} \tag{3.29}$$

$$M_{3}\dot{\hat{\nu}}_{3} = \tau_{3} - C_{3}(\hat{\nu}_{3})\hat{\nu}_{3} - D_{3}(\hat{\nu}_{3})\hat{\nu}_{3} + J_{3}^{T}(\hat{\psi})\hat{b} + J_{3}^{T}(\hat{\psi})K_{4}\tilde{y}$$
(3.30)

$$\hat{\boldsymbol{y}} = \hat{\boldsymbol{n}}_{3-veh} + \hat{\boldsymbol{n}}_{olas} = \hat{\boldsymbol{n}}_{3-veh} + \Lambda \hat{\boldsymbol{\xi}}$$
(3.31)

Donde \tilde{y} es el error estimado, calculado de la siguiente manera:

$$\tilde{\boldsymbol{y}} = \boldsymbol{y} - \hat{\boldsymbol{y}} = [x, y, \psi]^T - [\hat{x}, \hat{y}, \hat{\psi}]^T$$
(3.32)

La variable (\tilde{y}) comprende los errores de las tres variables medidas en el modelo no lineal de 3 *GDL*.

Los valores de ganancia son obtenidos como resultados de otras investigaciones, donde se propone la siguiente estructura para las matrices de ganancia, garantizando la estabilidad del observador propuesto:

$$\boldsymbol{K_1}(\hat{\boldsymbol{\omega}}_e) = \begin{bmatrix} k_{11}(\hat{\omega}_e) & 0 & 0\\ 0 & k_{12}(\hat{\omega}_e) & 0\\ 0 & 0 & k_{13}(\hat{\omega}_e)\\ k_{14}(\hat{\omega}_e) & 0 & 0\\ 0 & k_{15}(\hat{\omega}_e) & 0\\ 0 & 0 & k_{16}(\hat{\omega}_e) \end{bmatrix}$$
(3.33)

$$\boldsymbol{K_{2}}(\hat{\boldsymbol{\omega}}_{e}) = \begin{bmatrix} k_{21}(\hat{\omega}_{e}) & 0 & 0 \\ 0 & k_{22}(\hat{\omega}_{e}) & 0 \\ 0 & 0 & k_{23}(\hat{\omega}_{e}) \end{bmatrix}$$
(3.34)

$$\boldsymbol{K_3} = \begin{bmatrix} k_{31} & 0 & 0\\ 0 & k_{32} & 0\\ 0 & 0 & k_{33} \end{bmatrix}$$
(3.35)

$$\boldsymbol{K_4} = \begin{bmatrix} k_{41} & 0 & 0 \\ 0 & k_{42} & 0 \\ 0 & 0 & k_{43} \end{bmatrix}$$
(3.36)

Donde las matrices $\mathbf{K}_1(\hat{\omega}_e) \in \Re^{6x3}$ y $\mathbf{K}_2(\hat{\omega}_e) \in \Re^{3x3}$ están en función de la frecuencia de incidencia del oleaje estimada $(\hat{\omega}_e)$, mientras que $\mathbf{K}_3 \in \Re^{3x3}$ y $\mathbf{K}_4 \in \Re^{3x3}$ toman valores que no dependen de la misma. La estructura diagonal planteada para las matrices de ganancias permite un desacople entre los términos de los errores de estimación. Se logra un efecto de atenuación de componentes de frecuencia en la banda cercana a la frecuencia de incidencia del oleaje, siendo los parámetros de las matrices de ganancias dados por:

$$k_{1i(i=1,2,3)} = -2\zeta(\hat{\omega}_e); k_{1i(i=4,5,6)} = 2\zeta(\hat{\omega}_e)$$
(3.37)

$$k_{2i(i=1,2,3)} = 2(\hat{\omega}_e) \tag{3.38}$$

$$k_{3i(i=1,2,3)} > 0; k_{3i(i=1,2,3)} \le 1$$
 (3.39)

$$k_{3i(i=1,2,3)} \leq k_{3i}/T_b$$
(3.40)

3.4. Resultados

A pesar de diseñar el observador utilizando como estructura base las ecuaciones del vehículo de 3 GDL en el plano horizontal. En la simulación se utiliza el modelo dinámico general de 6 GDL de libertad como referencia para validar las estimaciones del observador. Además, fueron incluidas las fuerzas centrípetas y de Coriolis tanto en el modelo de simulación de 6 GDL como en el observador de estados. Se utilizó un controlador PI-D con ganancias Kp = 2, Kd = 1 y Ki = 0,2 para controlar el rumbo (ψ) del vehículo. La simulación se realiza con el motor en su valor máximo, y solamente se realizan variaciones al timón de rumbo, provocando que este solo se desplace en el plano horizontal. En la tabla 3–2 se muestran los valores deseados de rumbo colocados a la entradas del modelo del vehículo:

Tabla 3–2: Valores usados en la entrada.

Valor de ψ deseado	Instante de tiempo
$+45^{\circ}$	0 s
-90°	50 s

Dentro del modelo de simulación de 6 *GDL* fue puesta la velocidad de las corrientes marinas al valor $V_{corr}=0.2$ m/s, con un ángulo de incidencia $\beta_{corr}=30^{\circ}$. La frecuencia de encuentro ω_e con valor inicial de 5 rad/s, tomando 1.2 rad/s desde t= 100 s hasta el final de la simulación. Para el modelo de las olas se colocaron $\sigma=0.5$ y $\zeta=0.1$. Además el término $T_b=$ -diag[100,100,100] y los valores de las matrices de ganancia fueron establecidas como:

$$\mathbf{K}_{1}(\hat{\omega}_{\mathbf{e}}) = 2 * 50 \begin{bmatrix} -\zeta \mathbf{I}_{3\mathbf{x}\mathbf{3}} \\ \zeta \mathbf{I}_{3\mathbf{x}\mathbf{3}} \end{bmatrix} \hat{\omega}_{e}$$
(3.41)

$$\mathbf{K}_{2}(\hat{\omega}_{e}) = 2 * 50 \begin{vmatrix} \mathbf{I}_{3\mathbf{x}3} \\ \mathbf{I}_{3\mathbf{x}3} \end{vmatrix} \hat{\omega}_{e}$$
(3.42)

$$\mathbf{K_3} = \mathbf{I_{3x3}} \tag{3.43}$$

$$\mathbf{K_4} = diag[0,01,0,01,0,01] \tag{3.44}$$

En la figura 3–1 se muestra el esquema general utilizado en la simulación.



Figura 3–1: Esquema general utilizado en la simulación.

Como parte de la simulación y además para la validación del diseño del observador, en la figura 3–2 se muestra la trayectoria del vehículo (modelo de 6 GDL) y la trayectoria estimada por el observador. El modelo general de 6 GDL ha sido utilizado en distintas investigaciones para validar distintas estrategias de control, guiado y navegación obteniendo buenos resultados (Garcia, 2012)(Medina, 2016)(Valeriano, 2013b).

Se ha simulado un cambio en el estado del mar (para t=100 s), en las gráficas las oscilaciones inducidas por el oleaje comienzan a ser menores al aumentar la amplitud de las olas y disminuyendo la frecuencia de las mismas. A pesar de ello, el observador mantiene



Figura 3–2: Comportamiento de la estimación de la posición en el plano horizontal.

su desempeño debido a su característica no lineal, actualizando las matrices de ganancias en función de la nueva frecuencia de encuentro del oleaje. Esta actualización de las matrices da como resultado un observador con la propiedad de adaptación a los cambios de la frecuencia del oleaje. La figura 3–3 muestra el comportamiento del rumbo (ψ), siendo este el 3er estado contenido en el vector η_3 .



Figura 3–3: Comportamiento de la estimación de rumbo del observador no lineal. La figura 3–4 muestra el comportamiento del vector velocidad del vehículo ν_3 . En ella, se observa una estimación adecuada de los componentes de velocidad que intervienen, a pesar de que fue incluida la acción de corrientes marinas en la simulación.



Figura 3–4: Velocidades u, v, r y las correspondientes estimaciones del observador. En la figura 3–5 se muestra el comportamiento de la señal de mando utilizando como retroalimentación la señal sin filtrar con respecto al mando usando el observador.



Figura 3-5: Comportamiento de la señal de mando.

Luego en la tabla 3–3 se muestran los valores estadísticos correspondientes a las señales mostradas en la figura 3–5.

Tabla 3–3: Valores estadísticos de la señal de mando en lazo cerrado.

	Controlando sin observador	Controlando con observador
Media(°)	0.001763	-0.003597
Desviación estándar(°)	0.2468	0.1022

Con los valores mostrados en la tabla 3–3 se corrobora lo acertado del diseño propuesto como mecanismo de filtrado adaptable para el *HRC-AUV*, pudiéndose utilizar para otros vehículos. Además, se tiene una reducción considerable en la desviación estándar de la señal de mando, disminuyendo con esto el desgaste físico de los actuadores que intervienen en el control y resultando consigo una reducción en el consumo de energía. Estos constituyen elementos de suma importancia en este tipo de vehículos. Todo esto y adicionando también una mayor exactitud en el posicionamiento dinámico del vehículo en presencia de las perturbaciones de oleaje y corrientes marinas.

En la programación del observador se incluyó un código para disminuir los cálculos a realizar por el procesador. El mismo permite que las matrices del observador de ganancias variables en el tiempo sean fijadas por ciertos intervalos sin necesidad de actualizarse periódicamente. Existen diversos criterios para fijar los intervalos de actualización. Estos pueden ser ajustados para cada vez que el vehículo gire, cuando el sistema oscile constantemente, o cada cierto intervalo de tiempo. En este caso se ha especificado en el código que las ganancias sean recalculadas al transcurrir 100 segundos en la simulación. En la figura 3–6 se muestra en una curva el rumbo del vehículo y en la otra el momento en el cual fueron actualizadas las ganancias.

En su programación se hizo posible que, mediante un parámetro creado la condición de los 100 segundos pueda ser especificada a otro valor antes de comenzar la simulación. El código además incluye la posibilidad de actualizar las ganancias conjuntamente con los giros del vehículo.



Figura 3-6: Actualización de las ganancias con la variación de rumbo.

3.5. Análisis económico y medioambiental

En la actualidad existe una amplia gama de aplicaciones para el uso de los AUVs. Muchas compañías a nivel mundial compiten por su comercialización, provocando que alcancen precios muy elevados. La adquisición de uno de estos vehículos puede valorarse alrededor de los 2 millones de dólares estadounidense (USD), en dependencia de la calidad, tecnología usada y aplicaciones. Además, este gasto no incluye el costo de reparaciones, piezas de repuestos, manuales técnicos ni actualizaciones del software. Estos servicios brindados por corporaciones extranjeras, constituyen otra inversión a realizar, aumentando el valor agregado del vehículo. Cuba no tiene la posibilidad de adquirir dichos vehículos a tan altos precios.

El HRC-AUV es un vehículo diseñado y construido totalmente en Cuba. El hardware y los sensores instalados son de bajo costo. Un ejemplo es el sensor inercial instalado en el HRC-AUV (MTI-G de Xsens) está valorado en 5069 USD, mientras que en otros vehículos el costo en de este sensor alcanza los 9000 USD. Además, una placa dsPIC y una FPGA pueden ser adquiridas por el valor 30 USD cada una. El hecho de usar sensores de bajo costo es compensado con un mayor tratamiento de las señales a nivel de software; por lo que el proyecto HRC-AUV resulta viable desde el punto de vista económico para Cuba. La realización del proyecto permite que el país obtenga cierta independencia tecnológica, pudiendo desarrollar proyectos que tributen con esta línea investigativa y despertando además un gran interés en la comunidad científica.

La utilización de los AUVs en el marco de investigaciones científicas resulta de gran importancia para el país. El hecho de que esté completamente rodeado por agua permite una variedad de aplicaciones que contribuyen con el cuidado del medio ambiente, como lo son investigaciones relacionadas con biología marina, el control de calidad de las aguas, estudios meteorológicos y el cuidado y protección del ecosistema marino.

3.6. Consideraciones finales del capítulo

El observador no lineal implementado ha sido evaluado mediante una simulación contando con el modelo dinámico general de 6 GDL del HRC-AUV y con las perturbaciones oleaje y corrientes marinas incluidas. Las ganancias del observador fueron colocadas de manera tal que no afecta la estabilidad del sistema, siendo estas resultado directo de otras investigaciones. Estas varían en función de la frecuencia de encuentro que en la presente investigación se supone conocida, pero la misma puede ser obtenida en línea mediante un estimador de frecuencia.

Se comprobó que el observador realiza una estimación adecuada en los estados pertenecientes a los vectores de η_3 y ν_3 reduciendo los ruidos provocados por las perturbaciones. El análisis estadístico realizado a la señal del mando demuestra que el utilizar la señal de rumbo estimada para controlar el vehículo permite una reducción del desgaste de las partes físicas involucradas, disminuyendo también el consumo de energía; siendo dos características de suma importancia para el vehículo. Se incluyó dentro de la programación del observador una condición para reducir la frecuencia con las que se calculan las matrices de este, teniendo como resultado una reducción del procesamiento requerido.

CONCLUSIONES

Como resultado final de esta investigación se han implementado diversas estrategias para el filtrado de perturbaciones en el HRC-AUV que fueron evaluadas mediante simulaciones en el entorno Simulink de Matlab. Partiendo de este resultado se plantean las siguientes conclusiones generales:

- La utilización de observadores de estado resulta una alternativa adecuada para filtrar y compensar los efectos de los disturbios ambientales en el control de vehículos marinos. Estos, al estar diseñados a partir de los modelos matemáticos del sistema y de las perturbaciones, presentan un diseño robusto con respecto a las variaciones en los modelos utilizados, no agregan retardo de fase al sistema y cuentan con una rápida velocidad de respuesta.
- La optimización del código existente de los observadores diseñados para el *HRC-AUV* permite la implementación de estos en el hardware de bajo costo a bordo del vehículo, al emplear solo operaciones algebraicas en su ejecución.
- La implementación propuesta de un observador no lineal de 3 *GDL* de ganancias ajustables, en función de la frecuencia del oleaje, posibilita la adaptabilidad del algoritmo ante cambios en las condiciones de navegación.
- La evaluación mediante simulación de los observadores implementados, muestra un adecuado desempeño de los lazos de control de rumbo y profundidad, así como una alta precisión durante el seguimiento de trayectorias en el plano horizontal. En todos los casos, se logra una reducción considerable de las acciones de control, aspecto beneficioso durante las misiones autónomas con el vehículo.

RECOMENDACIONES

Para enfatizar en la continuidad investigativa que debe tener este trabajo se recomienda:

- Integrar el código optimizado en el hardware del *HRC-AUV*, con vistas a futuras evaluaciones mediante pruebas reales.
- Evaluar los observadores implementados con alguna estrategia de estimación de frecuencia, para el ajuste en línea de sus parámetros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, D.; Asim, M.; Wallam F.; Abbas A.; Naudhani Y. (2019). Experimental testing of observers comprising discrete kalman filter and high-gain observers. In: 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). pp. 1–5.
- Arroyave, L. ; Carvajal, M. ; Ceballos N. (2018). Navegación de robots móviles en entornos con discontinuidades: una revisión. *Revista Politécnica* 14(27), 103–115.
- Balchen, J.; Jenssen, N.; Sælid S. (1976). Dynamic positioning using kalman filtering and optimal control theory. In: *IFAC/IFIP symposium on automation in offshore oil field* operation. Vol. 183. p. 186.
- Balchen, J.; Jenssen, N.;Saelid S.; Mathisen E. (1980). Dynamic positioning of floating vessles based on kalman filtering and optimal control. In: 19th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes. pp. 852–864.
- Belleter, D. ; Galeazzi, R. ; Fossen T. (2015). Experimental verification of a global exponential stable nonlinear wave encounter frequency estimator. *Elsevier Science Ltd* 97(2), 48–56.
- Blidberg, D. (2001). The development of autonomous underwater vehicles (auv); a brief summary. In: International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- Carreras, M.; Candela, C.; Ribas D.; Palomeras N.; Magií L.; Mallios A.; Vidal E.; Pairet E.; Ridao P. (2018). Testing sparus ii auv, an open platform for industrial, scientific and academic applications. Sixth International Workshop On Marine Technology.
- Chen, B.; Li, R.; Bai W. (2018). Application analysis of autonomous underwater vehicle in submarine cable detection operation. In: International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering. pp. 71–75.
- Chen, C. (1998). *Linear system theory and design*. Oxford University Press Inc, Reino Unido.
- Costa, D. (2016). Estrategia de guiado para el seguimiento de objetivos móviles por parte del vehículo subacuático HRC- AUV. Trabajo de diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Cuba.
- Dantas, J.; da Cruz, J.; de Barros E. (2014). Study of autonomous underwater vehicle wave disturbance rejection in the diving plane. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 228(2), 122– 135.
- Dean, R.; Dalrymple, R. (1991). Water wave mechanics for engineers and scientists. Vol. 2.World Scientific Publishing Company, Singapur.

- Deng, F.; Yang, H.; Wang L. (2019). Adaptive unscented kalman filter based estimation and filtering for dynamic positioning with model uncertainties. *International Journal of Control, Automation and Systems* 17(3), 667–678.
- Faltinsen, O. (2005). *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge University Press, Estados Unidos.
- Fjellstad, O. (1994). Control of unmanned underwater vehicles in six degrees of freedom: A quaternion feedback approach. Tesis doctoral. Norwegian University of Science and Technology, Noruega.
- Fossen, T. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & Sons, Estados Unidos.
- Fossen, T. (2002). Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics, Noruega.
- Fossen, T. (2011). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Estados Unidos.
- Fossen, T. ; Strand, J. (1999). Passive nonlinear observer design for ships using lyapunov methods: full-scale experiments with a supply vessel. *Elsevier Science Ltd* **35**(1), 3–16.
- Fossen, T.; Pérez, T. (2009). Kalman filtering for positioning and heading control of ships and offshore rigs. *IEEE Control Systems* **29**(6), 46.
- Fossen, T.; Ross, A. (2006). Advances in unmanned marine vehicles. Institution of Engineering and Technology, Reino Unido.
- García, D. (2014). Desarrollo de técnicas de filtrado de las olas para la navegación y el control de un AUV. Tesis de maestría. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Cuba.
- Garcia, D. ; Valeriano, Y. ; Hernández L. ; Martínez A. (2012). Wave filtering for heading control of an auv based on passive observer. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* (*IJGMS*) 41(6), 540–549.
- González, L. (2004). Design, modelling and control of an autonomous underwater vehicle. Trabajo de diploma. The University of Western Australia, Australia.
- Guzmán, M.; Lara, J.; Hernández J.; Alazki H. (2018). Robust control for the dynamics of an unmanned surface vehicle under the perturbations (marine waves and currents).
 In: 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE). pp. 1–6.
- Hassani, V. ; Sørensen, A. ; Pascoal A. (2013). A novel methodology for robust dynamic positioning of marine vessels: Theory and experiments. In: *American Control Conferen*ce. pp. 560–565.
- Hassani, V.; Pascoal, A. (2015). Wave filtering and dynamic positioning of marine vessels using a linear design model: Theory and experiments. In: *Transport of Water versus Transport over Water*. pp. 315–343. Springer.

- Hegrenaes, O.; Hallingstad, O.; Jalving B. (2007). Comparison of mathematical models for the hugin 4500 auv based on experimental data. In: *THE IEEE Internatinal Symposium* on Underwater Technology.
- Jones, D.; Gates, A.; Huvenne V.; Phillips A.; Bett B. (2019). Autonomous marine environmental monitoring: Application in decommissioned oil fields. *Science of the Total Environment*.
- Lågstad, P.; Hagen, P.; Størkersen N. (2005). Recent results from military operations with the hugin 1000 auv. *Proc. UDT Europe 2005*.
- Liu, Z. (2015). Sensor fusion and observer design for dynamic positioning. Tesis de maestía. Delft University of Technology. Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Países Bajos.
- Liu, Z. (2017). Ship adaptive course keeping control with nonlinear disturbance observer. *IEEE Access* 5, 17567–17575.
- Martinez, A. ; Hernandez, L. ; Sahli H. ; Valeriano Y. ; Orozco M. ; Garcia D. (2015). Model-aided navigation with sea current estimation for an autonomous underwater vehicle. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 12(7), 103.
- Martínez, A.; Rodríguez, Y.; Hernández L.; Guerra C.; Lemus J.; Sahli H. (2013). Diseño de auv. arquitectura de hardware y software. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* **10**(3), 333–343.
- Medina, Y.; Tkachova, A.; Santana L.; Entenza P. (2016). Yaw controller in sliding mode for underwater autonomous vehicle. *IEEE Latin America Transactions* **14**(3), 1213– 1220.
- Moreno, H.; 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.
- Nezvadovitz, J.; Griessler, M.; Voight F.; Walters P.; Schwartz E. (2015). Subjugator 2015: design and implementation of a modular, high-performance auv. AUVSI Foundation s 18th Annual RoboSub Competition, San Diego, California.
- Nomoto, K.; Taguchi, T.; Honda K.; Hirano S. (1957). On the steering qualities of ships. International Shipbuilding Progress 4(35), 354–370.
- Ochi, M. (1998). Ocean waves: the stochastic approach. Vol. 6. Cambridge University Press, Reino Unido.
- Park, S.; Gil, M.; Im H.; Moon Y. (2019). Measurement noise recommendation for efficient kalman filtering over a large amount of sensor data. *Sensors* **19**(5), 1168.
- Robles, G. (2014). Diseño y estudio hidrodinámico de un submarino autónomo no tripulado: AUV. Trabajo de diploma. Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- Rodríguez, Y. (2011). Sistema remoto de supervisión y configuración de autopiloto de vehículo autónomo subacuático. Tesis de maestría. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Cuba.

- Sangekar, M.; Chitre, M.;Koay T. (2008). Hardware architecture for a modular autonomous underwater vehicle starfish. In: MTS/IEEE Conference and Exhibition. pp. 1–8.
- Sharples, R. (2010). The efficiency of reverse engineering in the design of the ORCA XI autonomous underwater vehicle. Trabajo de diploma. Massachusetts Institute of Technology, Estados Unidos.
- Siriyakorn, V.; Patchararungruang, A.; Sanposh P.; Tipsuwan Y.; Nakthewan C.; Kriangkhajorn S.; Thongtem N. (2019). Development of zeabus 2018 auv. In: *First International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*. pp. 143–146.
- SNAME (1950). Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No. pp. 1–5.
- Thirunavukkarasu, G.; Patrick, L.; Champion B.; Chua L.; Huynh V.; Joordens M. (2017). Design and development of a low-cost autonomous surface vehicle. In: 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE). pp. 1–6.
- Valeriano, M. (2013a). Modelado dinámico de un vehículo autónomo subacuático. Tesis de maestría. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Cuba.
- Valeriano, M. (2018). Esquema de guiado y control para el seguimiento de caminos rectos sin restricciones temporales de un vehículo subacuático sub-actuado. Tesis doctoral. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Cuba.
- Valeriano, Y.; Martínez, A.; Hernández L.; Sahli H.; Rodríguez Y.; Cañizares J. (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.
- Wang, Y.; Bevly, D.; Rajamani R. (2015). Interval observer design for lpv systems with parametric uncertainty. *Automática* **60**, 79–85.
- Yazdkhasti, S.; Sasiadek, J. (2018). Multi sensor fusion based on adaptive kalman filtering. In: Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control. pp. 317–333. Springer.
- Ye, H.; Chen, M.; Zeng Q. (2017). Horizontal motion tracking control for an underwater vehicle with environmental disturbances. In: 36th Chinese Control Conference (CCC). pp. 4952–4957.
- Zamora, H. (2010). Control de trayectoria para el HRC-AUV considerando el efecto del oleaje y las corrientes marinas. Trabajo de diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Cuba.
- Zhang, J.; Sun, W.; Feng Z. (2018). Vehicle yaw stability control via h-inf gain scheduling. Mechanical Systems and Signal Processing 106, 62–75.