

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Sistema de fusión de información para el  
CIDNAV-AUV**

**Autor: Rikel García Palacio**

**Tutor: Msc. Alain S. Martínez Laguardia**

**Santa Clara**

**2013**

**"Año 55 de la Revolución"**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Automática y Sistemas Computacionales**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Sistema de fusión de información para el CIDNAV-AUV**

**Autor: Rikel García Palacio**

email: [rikel@uclv.edu.cu](mailto:rikel@uclv.edu.cu)

**Tutor: Msc. Alain S. Martínez Laguardia**

Prof. Auxiliar

Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV

Email: [amlaguardia@uclv.edu.cu](mailto:amlaguardia@uclv.edu.cu)

**Consultante: Ing. Richar Sosa López**

**Santa Clara**

**2013**

**"Año 55 de la Revolución"**



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

---

Firma del Autor

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

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## PENSAMIENTO

*Mantengamos firme la esperanza que profesamos, porque fiel es el que hizo la promesa.*

*Hebreo 10.23.*

*El Señor no tarda en cumplir su promesa, según entienden algunos la tardanza. Más bien, él tiene paciencia con vosotros, porque no quiere que nadie perezca, sino que todos se arrepientan.*

*2 Pedro 1.4.*

## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis a aquellas personas que en algún momento pensaron de que yo no podía, y a aquella que me sostuvo en momentos en las cuales yo no le conocía, pero que ahora le conozco.*

## AGRADECIMIENTOS

*A mis compañeros de aula por muchas veces animarme y apoyarme.*

*A todos los que alguna vez me tendieron la mano para ayudarme.*

*A todos aquellos que me estiman y quieren que crezca como persona de principios y profesional de manera integral.*

*A mis suegros, por quererme y apoyarme como si fuera un hijo más.*

*A mis hermanitos de sangre, y de fe (Mey Lin, Frank, los Ales, los Dairon, Yosbel, Pedro y entre otros).*

*A mis padres por sostenerme, confiar y esperar pacientemente en mí.*

*A mi tutor Alain Martínez, por su disposición y dedicación en la realización de este*

*Trabajo de Diploma.*

*A mi hermosa, amada y querida esposa que me ha soportado en todo este tiempo y porque me va a seguir soportando.*

*Pero en general dedico mi tesis a alguien que no veo, pero, qué sé que está siempre conmigo en todo momento y que gracias a Él tengo todo en éste mundo y en el otro que voy a heredar. Gracias a Él hoy puedo dedicarles mi tesis a todas estas personas que me han apoyado, porque ha sido Él quien ha puesto a todos ellos en mi camino.*

## TAREA TÉCNICA

Para lograr el cumplimiento de los objetivos trazados en este trabajo de diploma nos proponemos llevar a cabo las siguientes tareas.

- Análisis de la estructura del modelo lineal.
- Simulación de los modelos Lineal y no-Lineal.
- Estudio del algoritmo de fusión de información *Kalman Filter*.
- Simulación de la estrategia modelo no-lineal+ *EKF* implementada en un trabajo previo de GARP.
- Simulación de la nueva estrategia *INS + ML + KF* propuesta recientemente por GARP.
- Comparación estadística de los resultados obtenidos por ambas estrategias.
- Elaboración de un informe con la calidad requerida por el departamento, que refleje el resultado del cumplimiento de las tareas anteriormente expuestas.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

Los Vehículos Autónomos Subacuáticos (AUVs) se han convertido en un tema de gran interés a nivel mundial. En Cuba, el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP) perteneciente a la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV) en conjunto con el Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CIDNAV) desarrollan un proyecto de investigación de estos vehículos llamado CIDNAV-AUV. En esta investigación se continúa el desarrollo del prototipo del vehículo autónomo CIDNAV-AUV con el diseño de una estrategia de fusión de información que permita mejorar el sistema de navegación. Por tanto, se realizará un análisis de la literatura revisada, se desarrollarán las ecuaciones del CIDNAV-AUV y se simulará el sistema de navegación inercial asistida del mismo, comparando las estrategias del NLDM+EKF (modelo no-lineal (MNL) + *Extended Kalman Filter (EKF)*) que ya ha sido implementado anteriormente y el DNVM+KF (modelo lineal (ML) + *Kalman Filter (KF)*) que se desarrolla en esta investigación en cuanto a prestaciones. Los resultados obtenidos demuestran que la estrategia DNVM+KF es una alternativa viable ante la actualmente empleada NLDM+EKF.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA .....	iv
RESUMEN .....	v
TABLA DE CONTENIDOS .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general .....	2
Organización del informe .....	3
Capitulario .....	3
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	4
1.1 Introducción .....	4
1.1.1 Definiciones .....	4
1.1.2 Antecedentes de los vehículos autónomos subacuáticos .....	5
1.1.3 Aplicaciones Principales .....	5
1.1.3.1 Ejemplos de AUV y sus sistemas de navegación.....	6
1.2 Descripción del vehículo autónomo subacuático CIDNAV-AUV .....	10

1.2.1	Modelado dinámico del CIDNAV-AUV .....	11
1.2.2	Arquitectura del Sistema.....	13
1.2.2.1	Sistema de Cómputo Inherente al Control del Vehículo.....	13
1.2.2.2	Sistema de Cómputo Inherente a la navegación del Vehículo.....	14
1.3	Sistema de Navegación Inercial.....	15
1.3.1	Sistema de Referencia.....	15
1.3.2	Sistema de Navegación Inercial.....	16
1.4	Navegación asistida por modelo dinámico.....	17
1.5	Consideraciones del capítulo .....	19
CAPÍTULO 2. OBTENCIÓN DEL MODELO DINÁMICO LINEAL DEL CIDNAV-AUV PARA SU USO EN TAREAS DE NAVEGACIÓN ASISTIDA .....		20
2.1	Introducción.....	20
2.2	Aspectos básicos de la modelación del CIDNAV-AUV .....	21
2.3	Derivación del modelo lineal para navegación .....	25
2.3.1	Punto de operación. ....	26
2.3.2	Modelo lineal invariante en el tiempo del CIDNAV-AUV.....	27
2.3.3	Consideraciones prácticas de implementación. ....	31
2.4	Derivación del modelo lineal para navegación.....	32
2.4.1	Ecuaciones del filtro de Kalman.....	35
2.5	Consideraciones del capítulo. ....	37
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		38
3.1	Introducción.....	38
3.2	Primera prueba de evaluación .....	40
3.3	Segunda prueba de evaluación .....	41
3.4	Tercera prueba de evaluación.....	44

3.5 Consideraciones del capítulo .....	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	48
Conclusiones .....	48
Recomendaciones .....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

## INTRODUCCIÓN

La exploración relacionada con la industria petrolera, el estudio de la biodiversidad marina y las investigaciones en el medio marino, ha llevado al ser humano a la necesidad de desarrollar vehículos capaces de alejar al ser humano de trabajos riesgosos y agotadores, surgiendo los *Vehículos Autónomos Subacuáticos (AUVs Autonomous Underwater Vehicles)*.

En la actualidad los *AUVs* gozan de gran popularidad y aceptación en la comunidad científica y empresarial ya que permiten explorar lugares en el fondo marino de difícil acceso a costos razonables. De igual forma la supervisión y el reconocimiento de áreas o estructuras resulta una tarea viable gracias a su empleo y esto sin tener la necesidad de poner en riesgo la vida del hombre.

A partir de la necesidad de implementar vehículos con mayores prestaciones, son varias las instituciones, centros de investigaciones y universidades que están inmersas en el desarrollo de estos vehículos. En Cuba este tema de investigación dados sus altos costes resulta complejo, no obstante dadas las ventajas a obtener con disponer de estos medios, han decidido a empresas como el CIDNAV a financiar proyectos relacionados.

Dentro de este marco de proyectos el CIDNAV presenta una solicitud al GARP de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas UCLV, teniendo en cuenta que este grupo ha tenido diversos resultados en el campo de la teledirección y modelado de vehículos (Martínez 2009; Pineda 2009). Así se establece una cooperación conjunta cuyo objetivo es el desarrollar en varias fases un *AUV* a partir de un vehículo construido por el CIDNAV.

Para cualquier *AUV* una de las tareas más complejas es conocer su posición en todo momento, ya que una vez sumergido la mayor parte de las tecnologías de navegación basadas en ondas de radio no estarán disponibles. La tecnología más comúnmente empleada en estos casos es la navegación inercial (*INS*), la que tomando una referencia de la aceleración del vehículo calcula mediante integración la velocidad y la posición. No obstante esta técnica es altamente imprecisa (sobre todo cuando se implementa con sensores de bajo costo) y tras un tiempo comienza a dar resultados inexactos producto de la integración de diversas fuentes de error. La literatura recoge que la solución más común a la hora de reducir estos errores es añadir a los sistemas sensores adicionales, como medidores de velocidad de efecto *Doppler* o cámaras. Pero estas soluciones además de no ser siempre eficaces resultan costosas. Surge de aquí la siguiente interrogante científica:

¿Es posible obtener una solución de navegación más fiable que el Sistema de Navegación Inercial (*INS*) por sí solo mediante el uso de la combinación *INS* con el modelo matemático de planta?

Basados en esta hipótesis y con el fin de validarla se trazan los siguientes objetivos:

### **Objetivo general**

- Mejorar el sistema de navegación diseñado para el CIDNAV-AUV, logrando una técnica de fusión de información que permita mejorar el desempeño del sistema de posicionamiento dinámico.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar una estrategia de fusión de información que permita lograr la navegación en un ambiente con perturbaciones.
- Simular el sistema de navegación inercial asistida del CIDNAV-AUV, comparando las estrategias modelo no-lineal (MNL) + *Extended Kalman Filter* (*EKF*) y modelo lineal (ML) + *Kalman Filter* (*KF*) en cuanto a prestaciones.

Como resultado se espera validar un nuevo sistema de navegación para el CIDNAV-AUV, y a su vez colaborar con el mejoramiento del sistema de navegación de vehículos autónomos sumergidos utilizados en la exploración y supervisión de objetivos.

### **Organización del informe**

En la introducción se dejará definida la importancia, actualidad y necesidad del tema que se aborda y se dejarán explícitos los elementos del diseño teórico.

### **Capitulario**

CAPÍTULO I: En el primer capítulo se realizará el análisis crítico de la literatura revisada. Se presentarán los principales conceptos que se tratan, introduciendo el tema de los vehículos autónomos. Se abordará la panorámica general existente en torno al problema que motiva esta investigación. Se detallará la arquitectura general del sistema para el CIDNAV-AUV. También se presentan diferentes trabajos realizados sobre fusión de información donde se utiliza el filtro de Kalman.

CAPÍTULO II: Aquí se presenta el desarrollo de las ecuaciones del modelo dinámico lineal requerido para la implementación del filtro de Kalman.

CAPÍTULO III: Se presentarán los resultados obtenidos mediante simulación de ambas estrategias realizando una comparación estadística contra un sistema de posicionamiento global.

Finalmente se dejarán plasmadas las conclusiones y recomendaciones generales del trabajo y la bibliografía consultada.

## CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Introducción

Los Vehículos Autónomos Subacuáticos (*AUVs*) se han convertido en un tema novedoso y de gran importancia para investigadores y empresas relacionadas al océano. Estos vehículos tienen aplicación en diferentes esferas investigativas desde su surgimiento, que van desde los buques de investigación científica hasta diversas aplicaciones industriales y militares ([Antonelli 2006](#); [Desa, Madhan et al. 2006](#)). En la actualidad existe un gran desarrollo de esta tecnología, pero sus inicios fueron aproximadamente hace 50 años en Estados Unidos ([Refsnes 2007](#)), expandiéndose posteriormente a otros países.

#### 1.1.1 Definiciones

**AUVs:** Los AUVs forman parte de un gran grupo de robot submarinos conocidos como Vehículos Submarinos no Tripulados (*UUV, Unmanned Underwater Vehicle*). ([Blidberg 2001](#); [Batlle, Ridao et al. 2004](#))

Los *AUVs* son vehículos motorizados que se trasladan en un medio acuático y realizan diferentes misiones sin llevar abordo operadores humanos. Su capacidad de navegación autónoma le permite ejecutar tareas previamente programadas. Además pueden ser dirigidos desde estaciones remotas ubicadas para su monitoreo.

**Filtro de Kalman:** El filtro de Kalman (*KF*) (discreto) calcula la mejor estimación de la situación actual (en el sentido del mínimo error medio cuadrado) sobre la base de las mediciones hasta el momento actual, denotado como: estimación de estado.

### 1.1.2 Antecedentes de los vehículos autónomos subacuáticos

En la década de los 60 se empiezan a realizar las primeras investigaciones sobre los AUVs, con el desarrollo de los vehículos *UARS* y el *SPURV* en la “Universidad de Washington” (Blidberg 2001). Luego le siguió el “Instituto de Oceanología de Shirshov” con el *Skat* (Blidberg 2001).

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

En la década del 80 y 90 el desarrollo de las tecnologías de cómputo tuvo un avance realmente notable en el mundo. Lo que antes era una dificultad, ahora se convertía en una gran ventaja gracias al desarrollo de las investigaciones realizadas. Esta década fue de hecho un punto de giro para la tecnología de los AUVs (Refsnes 2007), por el desarrollo de pequeñas computadoras de bajo consumo y suficiente memoria. Estas ofrecían el potencial necesario para implementar complejos algoritmos de navegación y control junto a la posibilidad de manejar datos de sensores de forma autónoma.

El comercio de estos vehículos ha crecido continuamente después del año 2000 (Wernli 2000; Antonelli, Fossen et al. 2008) gracias a las nuevas ventajas que brindan hoy día para la sociedad ya que se han convertido en una de las herramientas más potentes utilizadas en múltiples aplicaciones submarinas.

### 1.1.3 Aplicaciones Principales

La industria marítima ha crecido en la última década y las aplicaciones de estos vehículos son disímiles. Desarrollados con el objetivo de realizar tareas que eliminen los riesgos al ser humano, y que la realización de estas tareas sea del menor costo.

Diversas entidades explotan estos vehículos extensivamente en diferentes entornos (Rodríguez and L.Ramos 2011). A continuación se listan algunas de las tareas que estos medios desarrollan de forma común:

Industria Militar:

- Barrido y segmentación de campos minados.
- Exploración y detección de otros vehículos navales.

Industria Petrolera y de las Comunicaciones:

- Supervisión y Reparación de Estructuras Subacuáticas.

Ciencias Oceanográficas:

- Análisis y Conteo de Especies.
- Estudio de la Geografía Marina.
- Seguimiento de peces y grandes mamíferos

Rescate y Salvamento:

- Detección y Asistencia de Zonas de Desastres.
- Monitoreo de volcanes marinos

Recolección de datos sobre corrientes oceánicas

### 1.1.3.1 Ejemplos de AUV y sus sistemas de navegación

Tal vez el principal reto para los desarrolladores de *AUV* es mantener la precisión de la estimación de posición a lo largo del curso de la misiones de dichos vehículos. Los *AUV* representan un problema de navegación única, dado que operan de forma autónoma en un entorno altamente no estructurado donde la navegación satelital no está disponible directamente y por lo tanto, deben navegar utilizando otros medios alternativos que estén disponibles para la operación sumergida. Los métodos más comunes utilizados en la actualidad, son el sistema de navegación inercial (Fossen 2002), los de tiempo de propagación acústica (LaPointe 2006), los basados en tecnología *Doppler* (Lin and Wei 2004) y los que se apoyan en patrones del terreno (Tuohy, Leonard et al. 1996). Siendo la primera técnica básica para todos los casos.

### **Familia de AUVs “HUGIN”**

La operación autónoma en aguas profundas, requiere que el AUV maneje operaciones sumergidas durante largos periodos de tiempo. La solución de navegación para estos modernos AUVs es la fusión de información entre diferentes fuentes de posicionamiento como: el registro de la velocidad *Doppler (DVL)* y el *INS*.

El núcleo un sistema *INS+DVL* consiste de la *IMU*, las ecuaciones de navegación, el filtro de *Kalman* y el *DVL*. De forma adicional pueden ser añadidos otros sensores como un compás, sensores de presión o cualquier otro que pueda ayudar al proceso de determinación correcta del estado de la planta.

El *DVL* es un sensor absoluto, pero su precisión depende de la frecuencia a la que opera, a mayor frecuencia mayor precisión, pero menor alcance. Su mediciones son típicamente correctas cuando el lecho marino bajo el vehiculó no dista más de 120m.

Por su parte los sistemas de navegación inercial están usualmente clasificados, acorde a la desviación típica del crecimiento del error de posición. El *INS*, después de un corto tiempo, tendrá errores inaceptables en la estimación de posición. El sistema de navegación empleado por la familia de vehículos HUGIN en principio puede interconectar variadas fuentes de información. Siendo la decisión sobre la estructura de la misma de suma importancia, tanto desde su desempeño hasta desde el punto de vista económico.

En esta familia de vehículos existen diversas fuentes de posición que pueden estar disponible para asistir al *INS*, por ejemplo: sistemas de triangulación de onda larga(*LBL*) o ultra corta (*USBL*), técnicas basadas en patrones del terreno (*SLAM*), sistemas de navegación satelital (Kinsey, Eustice et al. 2006).

La idea básica de asistir al *INS* con sensores adicionales u otras vías auto contenidas como el modelo dinámico de la planta se muestran en la figura 1-1 (Hegrenaes, Hallingstad et al. 2007).

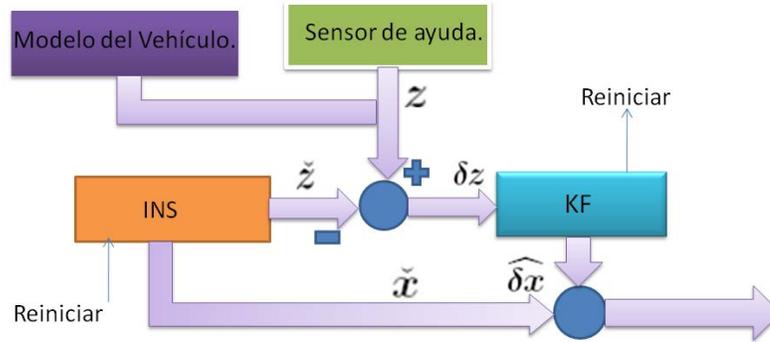


Figura 1-1. Idea básica para el *INS* asistido por el modelo dinámico de la planta.

En este esquema se aprecia que indistintamente se pueden emplear las mediciones de la unidad *DVL* o los estados estimados por el modelo del vehículo (para el presente caso no-lineal de 3-GDL), después de hacer las modificaciones necesarias en el *KF* (Filtro de Kalman). Siendo válido destacar que para el segundo caso no se requiere de ninguna instrumentación adicional a la ya instalada en el *AUV*. Un contorno más detallado del sistema de navegación es mostrado en la figura 1-2, destacándose que las principales ayudas están relacionadas con la estimación de la velocidad del vehículo con respecto al medio inercial.

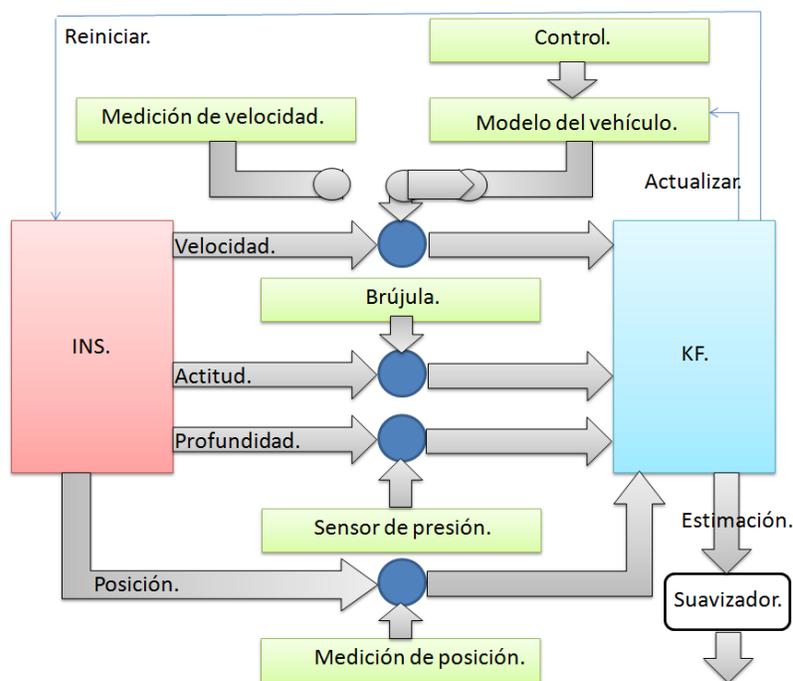


Figura 1-2. Diagrama en bloque del *INS* asistido por el modelo dinámico.

### **Infante AUV**

Similar al ejemplo anterior y con el fin de mejorar la estimación de posición del vehículo a partir de un sistema de navegación inercial (*INS*). Se ha diseñado en el INFANTE AUV varias estrategias para asistir el *INS* (Morgado, Oliveira et al. 2007). Las mismas abarcan el uso de sistemas de transmisión de onda ultra corta (*USBL*) y el empleo del modelo de la dinámica del vehículo (*VD*).

En la Figura 1-4 se representa la propuesta de arquitectura de navegación usada por este equipo de desarrollo para integrar el modelo del sistema (no-lineal de 3-GDL). El *INS* es la columna vertebral del algoritmo (Savage 1998a; Savage 1998b), realiza la integración numérica de la actitud, velocidad y posición, a partir de las mediciones de giroscopios y acelerómetros, montados rígidamente en la estructura del vehículo. El ruido causado por diversos efectos a las mediciones de los sensores es compensado con el uso del filtro extendido de Kalman (*EKF*), de acuerdo con una estructura de retroalimentación directa. Teniendo en cuenta las entradas de control, las ecuaciones de dinámica del vehículo se implementan en el modelo de estado del *EKF* y se fusionan con los datos del *INS*. Esto permite una mejora significativa de la estimación de las variables de salida del sistema. El *VD* mejora la observabilidad del sistema de navegación global, ya que el modelo del vehículo proporciona estimaciones redundantes de velocidades angulares y lineales (Morgado, Oliveira et al. 2007).

El sensor *USBL* consiste en una pequeña y compacta matriz de transductores acústicos que permite el cálculo de la posición del vehículo, basada en el tiempo de propagación de las señales acústicas emitidas por transmisores fijos en el lecho marino. Las mediciones proporcionadas por estos sistemas tienen muy bajas tasas de actualización (típicamente por debajo de 1 Hz) impuesta por las limitaciones físicas y las limitaciones específicas de la misión (velocidad de las ondas acústicas en el agua y otros disturbios).

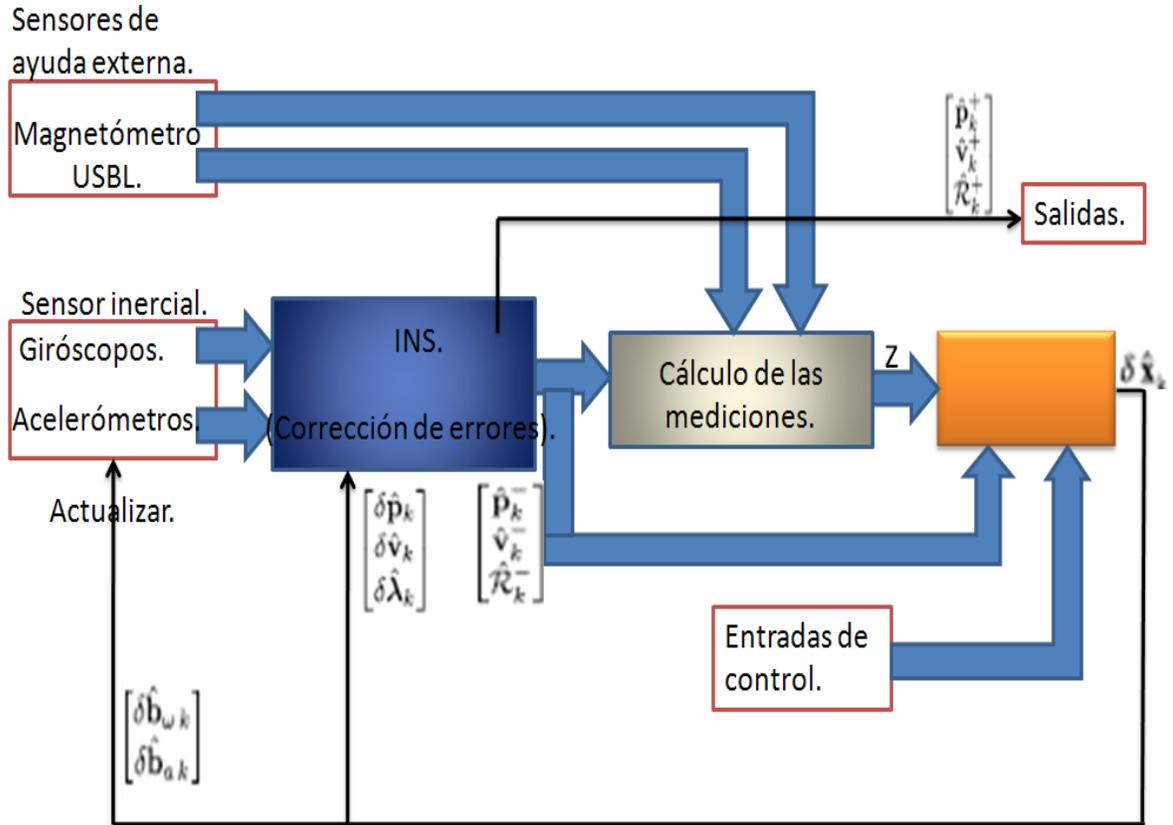


Figura 1-4. Diagrama de bloques del sistema de navegación usado por el INFANTE AUV.

## 1.2 Descripción del vehículo autónomo subacuático CIDNAV-AUV

El CIDNAV-AUV es un vehículo cilíndrico, con una estructura similar al HUGIN 4500 (Hegrenaes, Hallingstad et al. 2007) o al STARFISH (Sangekar, Chitre et al. 2008). En la tabla 1-1 se muestra los valores geométricos e inerciales del CIDNAV-AUV (Fernández 2012).

En la actualidad se cuenta con el diseño de los sistemas de navegación y de guiado del submarino, también del modelo dinámico no lineal de 6-GDL del vehículo.

Tabla 1-1: Valores geométricos e inerciales del CIDNAV-AUV.

Parámetros	Descripción	Valor
$m$	Masa.	4094.56 kg
$u_0$	Velocidad crucero.	1.9 m/seg
$n$	Revoluciones de la hélice.	52.36 rad/s
$L$	Longitud.	9.46 m
$R$	Radio.	0.4 m
$I_{zz}$	Momento de inercia.	20816 kgm <sup>2</sup>
$BG$	Distancia entre CG y CB.	[0, 0, 22 mm] <sup>T</sup>
$\delta_T$	Angulo de deflexión timón horizontal.	$\pm 30^\circ$
$\delta_E$	Angulo de deflexión del estabilizador de cola.	$\pm 30^\circ$

En la actualidad se trabaja en el perfeccionamiento de los sistemas de guiado y control, y en una investigación paralela a esta, la posibilidad de añadir al sistema capacidades de tolerancia a fallos durante la operación.

### 1.2.1 Modelado dinámico del CIDNAV-AUV

Para la obtención de este modelo se empleó un procedimiento basado en la geometría del AUV (Cañizares 2010) y algunos parámetros se determinaron mediante identificación experimental. Una vez obtenido el modelo general de 6-GDL del CIDNAV-AUV fue posible simplificarlo teniendo en cuenta las condiciones de operación, tal como se muestra en la Figura 1-5.

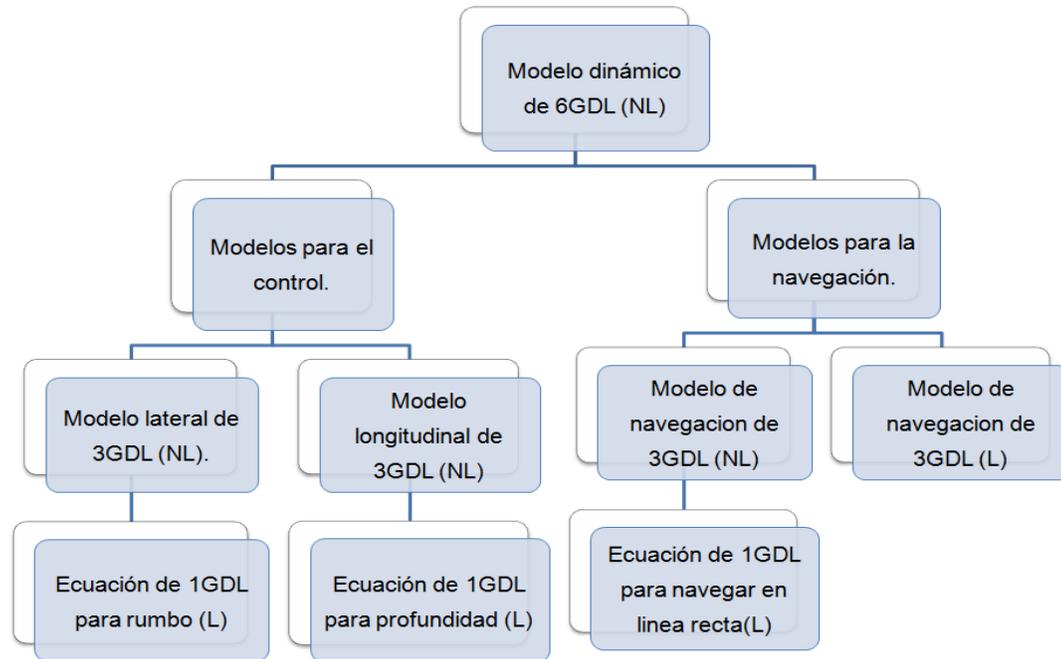


Figura 1-5. Estrategia de modelado empleada, y los modelos lineales y no lineales.

Para el caso del control, el modelo no lineal de 6-GDL se dividió en dos submodelos: lateral y longitudinal, de 3-GDL cada uno. Estos fueron simplificados aún más teniendo en cuenta que el AUV operará ante pequeñas variaciones alrededor del punto de operación con el objetivo de sintonizar controladores lineales (Cañizares 2010).

En el caso de la navegación se partió de asumir que el vehículo se movería en un solo plano, lo cual permitió expresar la dinámica a través de un submodelo no-lineal de 3-GDL (Cañizares 2010). Dicho modelo constituye la base para la obtención del modelo dinámico lineal en espacio estado usado en el presente documento.

En todos los casos son añadidas las principales fuentes de perturbaciones a la navegación, es decir: el oleaje generado por el viento y las corrientes marinas. Esto a través del uso de los modelos reportados por Thor I Fossen (Fossen 1994) en sus trabajos. La añadidura de estos componentes permite lograr mejores resultados y robustez del sistema de navegación y de control del CIDNAV-AUV diseñado por el Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) (Zamora 2011).

En investigaciones anteriores realizadas por GARP se presentó la validación del modelo general de 6-GDL y de los modelos usados para control, a través de su empleo



- Un microcontrolador *dsPIC* de la familia 30F4013 de la firma *Microchip*. emplazado en un *hardware* desarrollado por el GARP (donde están programados los lazos de control) que actúa como colector y procesador primario de las señales.
- Interruptor entre el estado manual o automático del sistema.
- Manejo de alarmas.
- Interfaces de *software* de bajo nivel, desarrolladas en *MPLAB* y *MicroC*.

#### Sensores Asociados:

Como sensores fundamentales presentes en este sistema tenemos:

- Sensores de agua para comprobar la hermeticidad del casco.
- Sensor de presión para determinar la profundidad del vehículo.
- Sensor para medir las rpm (revoluciones por minuto) del motor propulsor.
- Sensores de posición angular de los timones de la nave.
- Sensor de nivel de baterías.

#### **1.2.2.2 Sistema de Cómputo Inherente a la navegación del Vehículo**

Este sistema es el encargado de realizar las tareas de procesamiento y adquisición de las variables de navegación y en su versión 1.0 constaba de:

- PC industrial PC-103C de la firma *Advan Tech*. Debido a que este bloque tiene una alta carga matemática, es por esto que se elige una *CPU* más potente que en el caso anterior, para así cumplir con el muestreo mínimo para el sistema.
- Interfaces de *software* de alto nivel, desarrolladas en lenguajes como C++ y C#. Dichos *software* son los encargados de realizar todos los procesos de comunicación con la estación remota, generar los históricos del sistema e implementar la estrategia de guiado.

### Sensores Asociados:

Como sensores fundamentales presentes en la versión 1.0 del sistema, fueron:

- Unidad de Medición Inercial (*IMU*) MTi de la Xsens. Sistema fundamental para la navegación y el control, consta de tres acelerómetros, tres giróscopos y tres magnetómetros.
- Receptor de Sistema de Posicionamiento Global (*GPS*) XL12 de *Garmin*. Provee información de la posición y la velocidad del vehículo sin acumular el error.
- Añadidos a esto sensores se encuentran igualmente conectados a esta unidad los sistemas de transmisión inalámbrica.

## **1.3 Sistema de Navegación Inercial**

### **1.3.1 Sistema de Referencia**

Sería imposible realizar un desarrollo matemático, que describa el movimiento del vehículo sin tener un correcto establecimiento de los sistemas de referencia a emplear, ya que los mismos son imprescindibles para cualquier aplicación o sistema de navegación. Dado que en los mismos las variables relativas al movimiento toman sentido físico.

Aunque hay varios y su uso puede mejorar la precisión del sistema de navegación, solo serán comentados los que se van a utilizar en la investigación y con los que se han realizado las primeras pruebas experimentales reportadas por el GARP, que a su vez son los sistemas más usados para la navegación de vehículos de baja velocidad como el presente caso ([Shin 2005](#)):

***n-frame***: Sistema cartesiano ortogonal con origen en un punto del plano tangente al elipsoide terrestre, eje z apuntando al centro de la Tierra, eje x en dirección hacia el NORTE, y eje y ortogonalmente hacia la derecha. Este sistema es comúnmente denominado NED (*North, East, Down*).

**b-frame:** Sistema cartesiano ortogonal coincidente en el origen con el centro de masa del vehículo. Este es alineado con los ángulos que denotan la actitud: roll, pitch y yaw ( $\phi, \theta, \psi$ ) acorde al sistema de rotaciones denominado Ángulos de Euler (Fossen 1994; Titterton and Weston 2004), que son las componentes de un vector y que a su vez forman un tirabuzón ortogonal (adelante, derecha, abajo). Estos representan la rotación del sistema de coordenadas del cuerpo (*b-frame*) con respecto al plano de navegación (*n-frame*) (Fossen 1994; Titterton and Weston 2004).

En la figura 1-7, se observa una representación espacial de los sistemas anteriores.

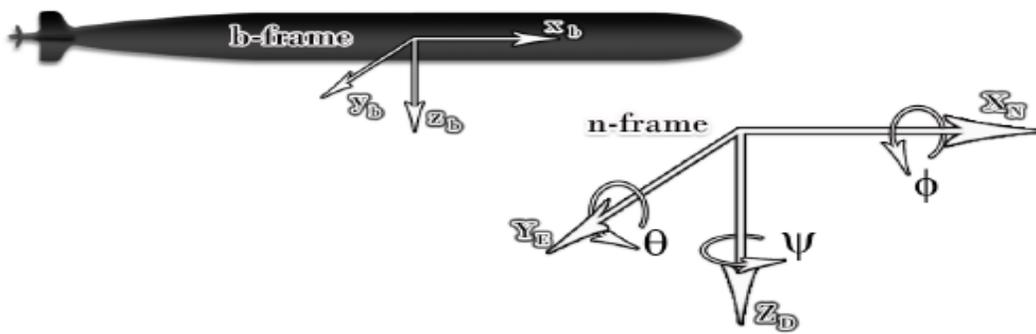


Figura 1-7 Sistemas de referencia *b-frame* y *n-frame*.

### 1.3.2 Sistema de Navegación Inercial

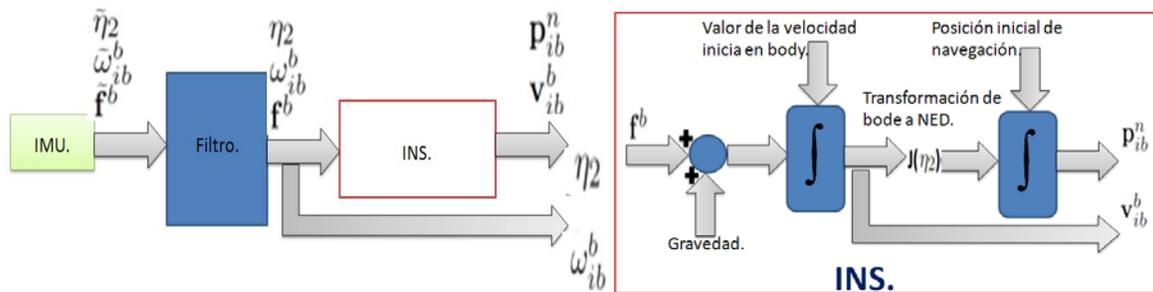


Figura 1-8. Solución de *IMU/INS*.

La solución inercial desplegada en el CIDNAV-AUV, es representada en la figura 1-8. En este esquema la aceleración debida a la gravedad es restada de las mediciones de los acelerómetros ( $f^b$ ) de la *IMU*. A continuación se lleva a cabo una integración para

obtener la velocidad del cuerpo  $\mathbf{v}_{ib}^b = (\mathbf{u}_{ib}, \mathbf{v}_{ib})$  la cual es transformada al plano *NED*, tomando ventaja de la salida de actitud de la *IMU* ( $\boldsymbol{\eta}_2$ ). Entonces, una segunda integración se realiza para obtener la posición de navegación  $\mathbf{p}_{ib}^n = (x, y)$ . Los valores iniciales de velocidad y posición se toman de las mediciones del *GPS*, previamente del comienzo de la misión sumergida.

#### 1.4 Navegación asistida por modelo dinámico

Normalmente en los vehículos autónomos se asiste la navegación con diferentes sensores siendo el más popular el *GPS*. El *GPS* ofrece una medición absoluta y precisa gracias al avance logrado en esta tecnología, el cual también ha permitido un mayor desarrollo en cuanto a lo referente a integración sensorial *INS/GPS*.

Realizar el modelo dinámico de un vehículo para la navegación es difícil y complejo. Siempre es una buena opción no modelar dinámicamente el sistema, ejemplo de esto lo representan los vehículos con teatro de operaciones a cielo abierto, donde se escoge la opción de integrar con el *GPS* y no con el modelo dinámico. En el caso de las aplicaciones submarinas o de los vehículos que operan bajo tierra se hace necesario asistir el *INS* con otras fuentes de información alternativas como pueden ser: odómetros, sensores *doppler* o el modelo dinámico, esto debido a que las señales de operación del *GPS* son incapaces de penetrar el suelo o el agua.

De todas las opciones anteriormente planteadas el uso del modelo dinámico tiene la ventaja de ser totalmente autocontenida y no requerir de ningún hardware adicional. En el mundo, se han realizado varias investigaciones sobre el tema, llamando la atención, los trabajos de varios investigadores de la Universidad de Sídney, Australia (Bryson and Sukkarieh 2006), (Sukkarieh, Gibbens et al. 2000), donde se exponen los principios teóricos y las estructuras para asistir a un *INS* con el modelo dinámico de la planta. Dichas estructuras pueden ser agrupadas en dos estrategias denominadas: *loosely coupled* y *tightly coupled*.

La estrategia *loosely coupled* es mostrada en la figura 1-9, emplea una configuración en la cual se restan las mediciones provenientes del *INS* y el modelo dinámico del vehículo (*DVM*), el error resultante pasa por un proceso de estimación óptima mediante el filtro extendido de Kalman y el error estimado es realimentado tanto en el modelo como en el *INS* corrigiendo la medición de ambos y garantizando la posterior convergencia del filtro.

Nótese que en este caso el vector de estado estimado lo constan el error de velocidad lineal ( $\delta v^n$ ) el error del vector de la actitud ( $\delta \psi$ ) el error de la aceleración ( $\delta f^b$ ) y la velocidad angular ( $\delta \omega^b$ ) respectivamente.

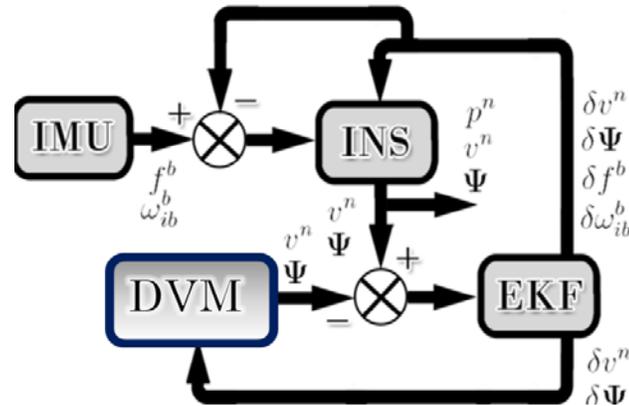


Figura 1–9: Estimación de velocidad y actitud.

En la figura 1–10, se muestra la estrategia *tightly coupled*, donde el vector de estado estimado está compuesto por los errores de la aceleración y de la velocidad angular ( $\delta f^b$ ) y ( $\delta \omega^b$ ) respectivamente. Posteriormente se le suman a la salida de las mediciones de la *IMU* para calcular los valores del *INS*. Esta configuración es menos robusta, debido a que todas las posibles incertidumbres del proceso de estimación, serán posteriormente integradas en el *INS* y el sistema divergirá con el tiempo. En la mayor parte de los casos esta estrategia requiere conocimiento de la estructura de los sensores para mejorar su respuesta.

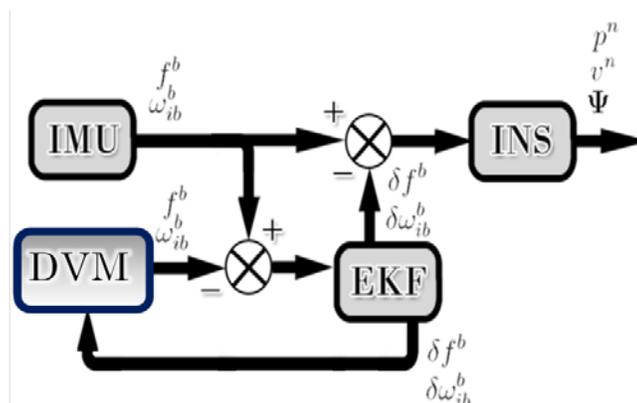


Figura 1–10: Estimación de aceleración y velocidad angular en *b-frame*.

Para la realización de la presente investigación, se considera la primera estructura la más adecuada para las condiciones de operación del CIDNAV-AUV.

### 1.5 Consideraciones del capítulo

A partir de la investigación realizada y trabajos previos (Sosa 2010) se pudo apreciar que el modelo dinámico del vehículo es una opción válida para asistir al *INS*. Quedando por analizar que estructura de dicho modelo es más útil para implementar el sistema de navegación, acorde a la estructura mostrada en la figura 1-11. Las posibles estructuras del modelo y sistema de fusión de información son: versión no-lineal de 6-GDL+*EKF* o una versión lineal simplificada de 3-GDL+*KF*. En el siguiente capítulo será planteado el desarrollo de esta última estructura del modelo. Es válido destacar que la versión lineal emplea menos parámetros que su contraparte no lineal y es más adecuada para su uso con otras estrategias de identificación de sistemas. No obstante para llegar a este modelo se deben realizar varias simplificaciones y consideraciones basadas en las condiciones de operación del vehículo. No obstante su sencillez pretendemos demostrar que provee resultados de igual o mayor valor cuantitativo que la estrategia empleada hasta el momento (Sosa 2010).

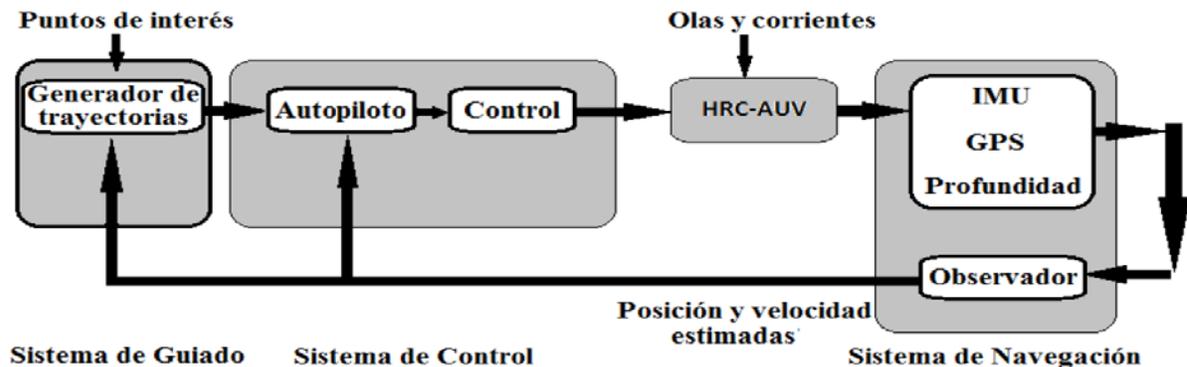


Figura 1–11: Estructura del sistema de navegación y control del CIDNAV-UAV

## **CAPÍTULO 2. OBTENCIÓN DEL MODELO DINÁMICO LINEAL DEL CIDNAV-AUV PARA SU USO EN TAREAS DE NAVEGACIÓN ASISTIDA**

### **2.1 Introducción**

Un paso importante en la investigación relacionada al CIDNAV-AUV lo constituyó la obtención del modelo dinámico del vehículo ([Valeriano-Medina, Martinez et al. 2012](#)). El modelo y sus versiones simplificadas (acorde a la figura 1-5) fueron utilizados para diseñar estrategias de control, el sistema de navegación y planificar una estrategia de tolerancia a fallos, aspectos todos que aseguran el cumplimiento de manera autónoma de las misiones programadas. Para obtener el modelo dinámico se utiliza un método “analítico y semi empírico” ([García, Almansa et al. 2012](#)) donde se parte de un modelo analítico obtenido a partir de los principios físicos del vehículo acorde al método de Fossen ([Fossen 1994](#)), complementado con valores numéricos obtenidos mediante ensayos e identificación experimental ([Valeriano-Medina, Martinez et al. 2012](#)).

De manera adicional al modelo propio del vehículo es necesario modelar las principales perturbaciones que afectan el comportamiento del mismo, siendo estas el oleaje generado por el viento y las corrientes marinas. En ([Fossen 1994](#)) ofrece un método que modela estas perturbaciones e incluye sus efectos en el modelo del vehículo.

Pese al innegable éxito alcanzado en la modelación del CIDNAV-AUV, los modelos obtenidos no son los más adecuados para trazar estrategias de fusión de información y ajuste de parámetros. En el presente capítulo se obtiene el modelo dinámico lineal de navegación (DNVM) de 3 grados de libertad (3GDL) del

CIDNAV-UAV, a partir del modelo dinámico no lineal (NLDM) de 6 grados de libertad (6GDL) descrito en (Valeriano-Medina, Martinez et al. 2012). Este modelo con una representación en espacio estado es el núcleo del observador propuesto para mejorar la estimación de las distintas variables de estado del vehículo.

## 2.2 Aspectos básicos de la modelación del CIDNAV-AUV

Para el estudio analítico del modelo de un AUV podemos considerar que dinámicamente un AUV se le puede suponer como un sólido rígido de 6 grados de libertad (6 GDL): tres coordenadas para los movimientos de traslación y otras tres para los movimientos de rotación. El movimiento de un AUV en el mar se describe respecto a un sistema de referencia inercial. Para las velocidades típicas de operación de los AUV puede considerarse que un sistema de referencia situado en tierra (OE) es un sistema inercial. Los ejes de coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de este sistema están direccionados hacia el norte, este y hacia abajo respectivamente (NED). En la figura 2.1 se describe el sistema de coordenadas utilizado en el desarrollo de este modelo acorde a (SNAME 1950), y en la tabla 2-1 la notación de las variables de rotación y traslación del vehículo.

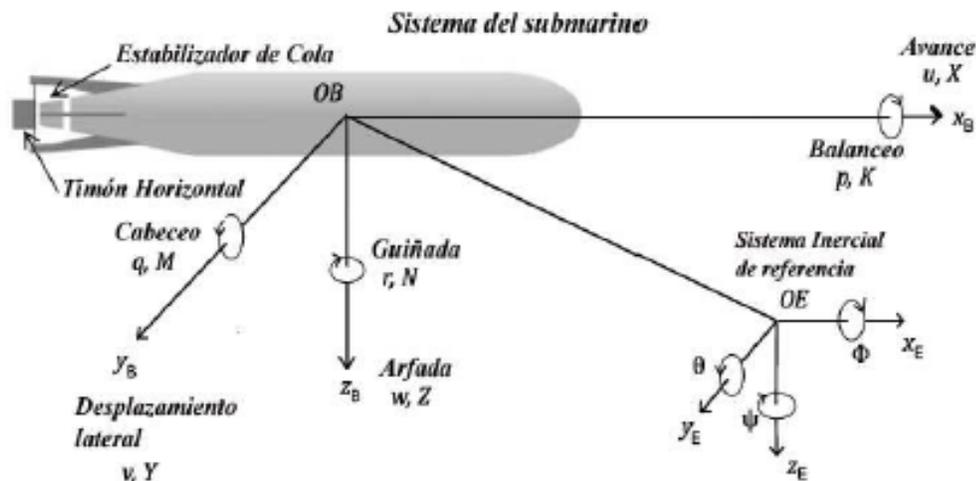


Figura: 2.1. Sistema de coordenadas utilizado

Tabla 2-1 Notación recomendada para el HRC-AUV.

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

Para el caso del CIDNAV-AUV, el origen del sistema de coordenada del vehículo coincide con el centro de flotación  $OB$ . Normalmente las velocidades lineales y angulares, así como las fuerzas y los momentos son referenciados con el sistema de coordenadas del vehículo y el sistema de referencia inercial es utilizado para representar la actitud del sistema.

El vector de velocidad  $\mathbf{v}$  con respecto al sistema de coordenadas fijo al vehículo ( $OB$ ) queda definido por:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad \text{donde} \quad \mathbf{v}_1 = [\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}]^T \quad \text{y} \quad \mathbf{v}_2 = [\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{r}]^T \quad (1)$$

El vector de posición y orientación respecto al sistema de coordenadas fijo en la superficie de la tierra,  $OE$ , está determinado por:

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_1 \\ \boldsymbol{\eta}_2 \end{bmatrix} \quad \text{donde} \quad \boldsymbol{\eta}_1 = [\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}]^T \quad \text{y} \quad \boldsymbol{\eta}_2 = [\boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\psi}]^T \quad (2)$$

La relación cinemática entre la velocidad fijada en el cuerpo y la posición fijada en tierra se expresan a continuación (Fossen 1994):

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \quad (3)$$

Las ecuaciones dinámicas no lineales en movimientos pueden ser expresadas en forma compacta como:

$$\underbrace{\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{términos del cuerpo rígido}} + \underbrace{\mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}}_{\text{términos hidrodinámicos}} + \underbrace{\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}_{\text{términos hidrostáticos}} = \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

Incluyendo los principales disturbios marinos la ecuación 5 puede ser expresada como:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{olas} \quad (5)$$

En esta estructura  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A$  que es la matriz de inercia incluyendo las masas añadidas  $\mathbf{C}(\mathbf{v}_r) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}_r) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}_r)$  es la matriz de Coriolis y fuerzas centrífugas incluyendo las masas añadidas,  $\mathbf{D}(\mathbf{v}_r)$  es la matriz de amortiguamiento,  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  es el vector de momentos gravitacionales y de flotación,  $\boldsymbol{\tau}_{olas}$  representa el movimiento y fuerzas causadas por las olas, y  $\boldsymbol{\tau}$  es el vector de entrada de control.

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c \quad (6)$$

El vector  $\mathbf{v}_r$  representa la velocidad relativa que incluye la influencia de la corriente de mar como en (6), donde  $\mathbf{v}$  es el vector de velocidad de vehículo y  $\mathbf{v}_c = [u_c \ v_c \ w_c \ 0 \ 0 \ 0]^T$  es el vector de velocidad de las corrientes referidas a  $OB$ , considerando que las corrientes no generan rotación en el vehículo.

Los términos del cuerpo rígido se determinan a partir de las siguientes expresiones (Hegrenaes, Berglund et al. 2008; Hegrenaes and Hallingstad 2011):

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3 \times 3} & -m\mathbf{S}(\mathbf{BG}) \\ m\mathbf{S}(\mathbf{BG}) & \mathbf{S}(\mathbf{I}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix} m\mathbf{S}(\mathbf{v}_2) & -m\mathbf{S}(\mathbf{v}_2)\mathbf{S}(\mathbf{BG}) \\ m\mathbf{S}(\mathbf{v}_2)\mathbf{S}(\mathbf{BG}) & \mathbf{S}(\mathbf{I}\mathbf{v}_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde  $m$  representa la masa del vehículo,  $\mathbf{I}_{3 \times 3}$  la matriz identidad de orden tres,  $\mathbf{S}(\ast)$  es una estructura no simétrica de un vector dado ( $\ast$ ); e  $\mathbf{I}$  es la matriz de inercia respecto al origen del sistema de referencia  $OB$ .

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & -I_{xz} \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ -I_{zx} & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}$$

Por su parte los términos de Coriolis y fuerza Centrífuga se determinan como:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

mientras que

$$M_A = -\text{diag}\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\} \quad (10)$$

La matriz de amortiguamiento puede ser calculada mediante una estructura diagonal teniendo en cuenta los términos lineales y cuadráticos.

$$D(v) = -\text{diag}\{X_u + X_{u|u}|u|, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \quad (11)$$

Para el cálculo del vector de momentos gravitacionales y de flotabilidad se tiene en cuenta que el CIDNAV-AUV está diseñado con flotabilidad nula, de ahí que la expresión sea:

$$g(\eta) = [0, 0, 0, WBG_z \cos \theta \sin \phi, WBG_z \sin \theta, 0]^T \quad (12)$$

El CIDNAV-AUV cuenta con tres actuadores: una hélice caracterizada por su velocidad de rotación  $n$ , un timón de cola para los giros en el plano horizontal caracterizado por su ángulo de deflexión  $\delta_T$  y un estabilizador de cola para las maniobras en el plano vertical caracterizado por su ángulo de deflexión  $\delta_E$ . Los actuadores se encuentran ubicados en la popa del vehículo. De ahí que el brazo del momento provocado por la ubicación del actuador respecto al origen esté dado por  $r = [l_x, l_y, l_z]^T = [4 \text{ m}, 0, 0]^T$ .

Teniendo en cuenta estos elementos, la configuración del vector de entradas de control del CIDNAV-AUV está dada por:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_Z \\ \tau_K \\ \tau_M \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \\ 0 & b_4 & 0 \\ 0 & 0 & b_5 \\ 0 & b_6 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n|n \\ \delta_T \\ \delta_E \end{bmatrix} \quad (14)$$

Tras el análisis geométrico, un grupo de experimentos y pruebas de mar (Valeriano-Medina, Martinez et al. 2012) fue posible determinar los parámetros que componen este modelo. Dichos parámetros están descritos en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Parámetros que componen el vehículo.

Descripción	Términos	Valor.	Términos	Valor.
Masas añadidas	$X_{\dot{u}}$	-250.84kg	$K_p$	0
	$Y_{\dot{v}}$	-3834kg	$M_{\dot{q}}$	-15572kgm <sup>2</sup>
	$Z_{\dot{w}}$	-3834kg	$N_{\dot{r}}$	-15572kgm <sup>2</sup>
Términos de arrastre lineal	$X_u$	$-181.45 \frac{N}{m/s}$	$K_p$	$-126.62 \frac{Nm}{rad/s}$
	$Y_v$	$-1219.8 \frac{N}{m/s}$	$M_q$	$-9096.9 \frac{Nm}{rad/s}$
	$Z_w$	$-1219.8 \frac{N}{m/s}$	$N_r$	$-9096.9 \frac{Nm}{rad/s}$
Coeficiente de ganancia del actuador	$b_1$	$0.1946 \frac{N}{(rad/s)^2}$	$b_4$	$-7.0 \frac{Nm}{rad}$
	$b_2$	$318.39 \frac{N}{rad}$	$b_5$	$96.32 \frac{Nm}{rad}$
	$b_3$	$-24.1 \frac{Nm}{rad}$	$b_6$	$1273.56 \frac{Nm}{rad}$
Término cuadrático de arrastre	$X_{u u }$	$-47.49 \frac{N}{m^2/s^2}$		

### 2.3 Derivación del modelo lineal para navegación

Para tareas de análisis, diseño de sistemas de control y varias estrategias de fusión de información la obtención de aproximaciones lineales de los modelos dinámicos es altamente común (García 2010; Valeriano-Medina, Martinez et al.

2012). Para la obtención de una buena aproximación lineal del modelo matemático de un sistema físico es recomendable estudiar el comportamiento del sistema a pequeñas variaciones alrededor de un punto de operación.

### 2.3.1 Punto de operación.

Como en las mayorías de los casos prácticos las ecuaciones no lineales de movimiento (5) y (3), pueden ser linealizadas alrededor de un punto de operación (Fossen 1994). En nuestro caso este punto se definirá por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_o(t) \\ \boldsymbol{\eta}_o(t) \end{bmatrix} \text{ donde } \begin{matrix} \mathbf{v}_o = [\mathbf{u}_o(t) & \mathbf{v}_o(t) & \mathbf{w}_o(t) & \mathbf{p}_o(t) & \mathbf{q}_o(t) & \mathbf{r}_o(t)]^T \\ \boldsymbol{\eta}_o = [x_o(t) & y_o(t) & z_o(t) & \phi_o(t) & \theta_o(t) & \psi_o(t)]^T \end{matrix} \quad (15)$$

Ya que la linealización se basa en la perturbación estas pueden definirse como:

$$\Delta \mathbf{v}(t) = \mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_o(t), \quad \Delta \boldsymbol{\eta}(t) = \boldsymbol{\eta}(t) - \boldsymbol{\eta}_o(t) \quad \text{y} \quad \Delta \boldsymbol{\tau}(t) = \boldsymbol{\tau}(t) - \boldsymbol{\tau}_o(t) \quad (16)$$

Consecuentemente después de la expansión en serie de Taylor alrededor del punto de operación,  $(\mathbf{v}_o, \boldsymbol{\eta}_o)$ , la ecuación de movimiento (5) puede escribirse de la siguiente forma:

$$\mathbf{M} \Delta \dot{\mathbf{v}} + \left. \frac{\partial \mathcal{C}(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_o} \Delta \mathbf{v} + \left. \frac{\partial \mathcal{D}(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_o} \Delta \mathbf{v} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}{\partial \boldsymbol{\eta}} \right|_{\boldsymbol{\eta}_o} \Delta \boldsymbol{\eta} = \Delta \boldsymbol{\tau} \quad (17)$$

Con la adición de las perturbaciones (Fossen 1994) la ecuación (3), toma la forma:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_0 + \Delta \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}_0 + \Delta \boldsymbol{\eta})(\mathbf{v} + \Delta \mathbf{v}) \quad (18)$$

Sustituyendo  $\dot{\boldsymbol{\eta}}_0 = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}_0)\mathbf{v}_0$  en la expresión anterior y omitiendo el rendimiento de los términos de 2do orden se obtiene:

$$\Delta \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}_0)\Delta \mathbf{v} + \mathbf{J}^*(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}_0)\Delta \boldsymbol{\eta} \quad (19)$$

donde

$$\mathbf{J}^*(\mathbf{v}_0, \boldsymbol{\eta}_0)\Delta \boldsymbol{\eta} = [\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}_0 + \Delta \boldsymbol{\eta}) - \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}_0)]\mathbf{v}_0 \quad (20)$$

Estableciendo  $\mathbf{x}_1 = \Delta \mathbf{v}$  y  $\mathbf{x}_2 = \Delta \boldsymbol{\eta}$  es posible presentar un modelo lineal del vehículo que varía en el tiempo:

$$M\dot{x}_1 + C(t)x_1 + D(t)x_1 + C(t)x_2 = \tau \quad (21)$$

$$\dot{x}_2 = J(t)x_1 + J^*(t)x_2 \quad (22)$$

donde

$$C(t) = \left. \frac{\partial C(v)v}{\partial v} \right|_{v_0}, \quad D(t) = \left. \frac{\partial D(v)v}{\partial v} \right|_{v_0}, \quad G(t) = \left. \frac{\partial g(\eta)}{\partial \eta} \right|_{\eta_0}$$

$$J(t) = J(\eta_0(t)), \quad J^*(t) = J^*(v_0(t), \eta_0(t)) \quad (23)$$

Finalmente la representación lineal en espacio estado del modelo se puede plantear de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}(C(t) + D(t)) & -M^{-1}G(t) \\ J(t) & J^*(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M^{-1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tau \quad (24)$$

Partiendo de la ecuación (24) es posible obtener la representación lineal de los diferentes planos en un vehículo submarino. En (Budyono 2009) este procedimiento ha sido utilizado para obtener la representación lineal en el plano longitudinal y en (Isiyel 2007) para el plano lateral.

### 2.3.2 Modelo lineal invariante en el tiempo del CIDNAV-AUV.

La operación nominal del CIDNAV-AUV está planteada de tal modo que el vehículo se mueve en un plano horizontal con dirección  $\psi_0$  y una velocidad constante de  $u_0 = 1.9 \text{ m/s}$ . Bajo estas condiciones, el vehículo realiza trayectorias aproximadamente en línea recta, discurrendo entre los distintos puntos de control sin cambiar la profundidad ( $z_0 \approx \text{constante}$ ,  $w_0 = 0$ ). Además es posible asumir que el sistema navega sin necesidad de maniobrar fuertemente, de aquí que esté caracterizado por:  $p_0 = q_0 = 0$ , de igual forma los ángulos de roll y pitch se pueden considerar con valor cero  $\theta_0 = \phi_0 = 0$ , y  $v_0 \approx 0$ .

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores el punto de operación se define como:

$$x_{L0} = \begin{bmatrix} v_{L0} \\ \eta_{L0} \end{bmatrix} \quad \text{donde,} \quad \begin{aligned} v_{L0} &= [u_{L0} \quad 0 \quad 0]^T \\ \eta_{L0} &= [0 \quad 0 \quad \psi_{L0}]^T \end{aligned} \quad (25)$$

De la misma forma la ecuación de las perturbaciones (16) se reduce a:

$$\Delta \mathbf{v} = [\Delta u_L \quad \Delta v_L \quad \Delta r_L]^T \text{ y } \Delta \boldsymbol{\eta} = [\Delta x_L \quad \Delta y_L \quad \Delta \psi_L]^T \quad (26)$$

Además de los estados de velocidad y actitud nuestro modelo considera 3 variables de estado adicionales relacionadas con las corrientes y el oleaje. Siguiendo la notación de (Fossen 1994) los componentes de las corrientes se puede definir mediante 2 parámetros, la velocidad promedio de la corriente  $V_c$  y la dirección de la corriente  $\beta$ :

$$\begin{aligned} u_c &= V_c \cos(\beta - \psi_L) \\ v_c &= V_c \sin(\beta - \psi_L) \end{aligned} \quad (27)$$

La velocidad promedio,  $V_c$  se puede definir como un proceso de primer orden de *Gauss-Markov* de acuerdo a:

$$\dot{V}_c = -\mu_o V_c + \omega_l \quad (28)$$

Donde  $\omega_l$  el ruido blanco Gaussiano con media cero y  $\mu_o \geq 0$  es una constante. Fijamos  $\mu_o = 0$  que corresponde a un camino aleatorio. Entonces  $V_c$  es nuestro estado adicional considerando las corrientes.

Para la navegación en la superficie o cerca de la superficie, las olas constituyen un problema, ya que producen oscilaciones pequeñas en todos los estados del vehículo. De ahí que su modelación permita minimizar su efecto por la vía del filtrado (Garcia-Garcia, Valeriano-Medina et al. 2012). En nuestro caso para la modelación de las olas, las variables de estado  $(\dot{x}_{h1}, \dot{x}_{h2})$  han sido consideradas como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{h1} \\ \dot{x}_{h2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -w_{v0}^2 & -2\zeta w_{v0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{h1} \\ x_{h2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_f \end{bmatrix} \mathbf{w}_h \quad (29)$$

$$K_f = 2\zeta w_{v0} \sigma_{w_v}$$

donde  $\sigma_{w_v}$  es una constante que describe la intensidad de las olas,  $\zeta = 0.1$  es un factor de amortiguamiento,  $w_{v0}$  es la frecuencia fundamental de oleaje y  $\omega_h$  es un ruido blanco Gaussiano con media cero.

Partiendo de la ecuación (24) y teniendo en cuenta las consideraciones anteriores (punto de operación y perturbaciones), la representación lineal de espacio estado para el CIDNAV-AUV queda definida por:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_L \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_L \\ \dot{x}_{h1} \\ \dot{x}_{h2} \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{M}_L^{-1}(\mathbf{C}_L(\mathbf{v}_{L0}) + \mathbf{D}_L(\mathbf{v}_{L0})) & \mathbf{0}_{(3 \times 3)} & \mathbf{0}_{(3 \times 1)} & \mathbf{0}_{(3 \times 1)} & \mathbf{C}_r(3 \times 1) \\ \mathbf{J}_L(\boldsymbol{\eta}_{L0}) & \mathbf{0}_{(3 \times 3)} & \mathbf{0}_{(3 \times 1)} & \mathbf{0}_{(3 \times 1)} & \mathbf{0}_{(3 \times 1)} \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & -w_{v0}^2 & -2\zeta w_{v0} & 0 \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & 0 & 0 & -\mu_o \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_L \\ \boldsymbol{\eta}_L \\ x_{h1} \\ x_{h2} \\ V_C \end{bmatrix} + \\
 &\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{M}^{-1} \\ \mathbf{0}_{(3 \times 3)} \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \boldsymbol{\tau}_L + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(7 \times 1)} & \mathbf{0}_{(7 \times 1)} \\ K_w & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{E}} \begin{bmatrix} w_h \\ w_l \end{bmatrix} \quad (30)
 \end{aligned}$$

La ecuación (30) es una representación lineal de espacio estado invariante en el tiempo acorde a la estructura:  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{w}$ . Que denominaremos como el modelo dinámico del vehículo para la navegación (*DNVM*).

Como se puede ver la ecuación del *DNVM* depende del rumbo ( $\psi_0$ ), sin embargo se puede demostrar que esta dependencia no altera los valores propios de la matriz  $\mathbf{A}$  (Fossen 1994). Los distintos términos de la ecuación (30) quedan representados de la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_L &= \begin{bmatrix} m + X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m + Y_{\dot{u}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} + N_r \end{bmatrix} & \mathbf{C}_L &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (m - X_{\dot{u}})u_{L0} \\ 0 & (Y_{\dot{u}} - X_{\dot{u}})u_{L0} & 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{D}_L &= \begin{bmatrix} (X_u + X_{u|u})|u_0| & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} & \boldsymbol{\tau}_L &= \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |n| \\ |n| \\ \delta T \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



$$\mathbf{\Gamma} = 1.0^{e-0.04} \begin{bmatrix} 0.0026 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3749 & 0.0027 \\ 0 & 0 & 0.0189 \\ 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0019 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{E}_d = 1.0^{e-0.04} \begin{bmatrix} 0 & 0.006 \\ 0 & 2.26 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.007 \\ 0 & 0 \\ 0.29 & 0 \\ 59.6 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ r_L \\ x_L \\ y_L \\ \psi_L \\ x_{h1} \\ x_{h2} \\ V_c \end{bmatrix}$$

El término  $\mathbf{W}_{Lk-1}$  representa el ruido del sistema  $\mathbf{W}_L \sim \mathbf{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q})$ , con  $\mathbf{Q} = \text{diag}(0.02, 0.02, 0.01, 0.1, 0.1, 0.1, 0.01, 0.01)$

### 2.3.3 Consideraciones prácticas de implementación.

El CIDNAV-AUV ha sido diseñado para operar en el océano con corrientes de magnitud no mayor a 0.3 m/s y una altura media de olas correspondientes al nivel fuerza 3. La velocidad crucero del CIDNAV-AUV  $u_0 = 1.9 \text{ m/s}$  se obtiene a 500 rpm aproximadamente, de la velocidad de propulsión del motor. Esta condición solamente cambia debido a perturbaciones ambientales porque la propulsión del motor está directamente conectada a las baterías, sin ningún sistema de regulación.

De acuerdo al diseño mecánico del CIDNAV-AUV el ángulo de deflexión del timón de la cola es de  $\pm 30^\circ$  (Tabla 1-1) con una velocidad máxima de giro de  $4^\circ/\text{s}$ . Esta velocidad de giro es mayor a la deseada para obtener el comportamiento de estabilidad asumido durante las maniobras más pronunciadas esperadas (cambios de dirección  $\pm 90^\circ$ ). A partir de varias simulaciones fue posible determinar que la reducción de estos parámetros a solo  $0.8^\circ/\text{s}$  asegurará el funcionamiento suave requerido. También se estableció un límite de 100m entre sucesivas maniobras.

El punto de operación del CIDNAV-AUV se cambiará cada vez que el curso  $\psi_{L0}$  difiera en  $6^\circ$  del curso estimado  $\psi_L$ . Este valor ha sido elegido después de comprobar la máxima afectación causada por las olas de forma transitoria en el rumbo. El nuevo punto de operación es establecido, con  $\psi_{L0} = \psi_L$  y mediante la actualización del ángulo entre el vehículo y la corriente oceánica ( $\beta - \psi_{L0}$ ). Para

este análisis se consideró que la dirección de la corriente oceánica ( $\beta_c$ ) es constante.

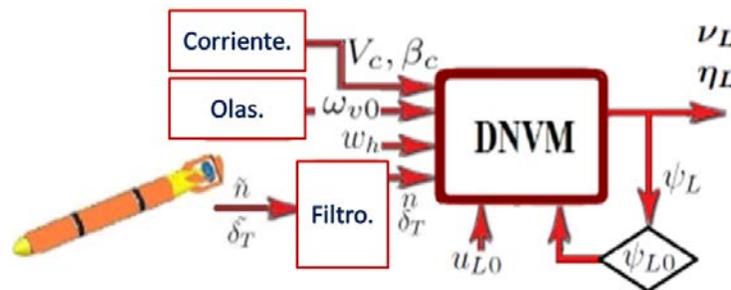


Figura 2-2. Estructura de entradas/salidas del DNVM

## 2.4 Derivación del modelo lineal para navegación.

La desventaja principal de los *INS* (principalmente cuando se utilizan sensores de bajo costo, como en nuestro caso), es el crecimiento del error en los estimados de la posición debido a la naturaleza del método. Tradicionalmente sensores externos como el *GPS*, medidores de velocidad por efecto *Doppler* (*DVL*) o cámaras, han sido utilizados para complementar el sistema de navegación inercial, con el objetivo de disminuir los errores en la estimación de posición. En este trabajo, seguimos la idea y el concepto de utilizar el modelo dinámico del vehículo para complementar el *INS* (Hegrenaes, Hallingstad et al. 2007; Hegrenaes and Hallingstad 2011).

La idea básica de utilizar el modelo dinámico del vehículo para complementar el *INS* es mostrada en la figura 2-3a, donde el registro de salida del modelo es tratado análogamente, como un sensor de ayuda externa. Como se mencionó en la introducción esta estructura fue empleada con éxito mediante simulación en un trabajo previo (Sosa 2010). No obstante consideramos que en un entorno real con mayores incertidumbres puede no ser la más adecuada, ya que impide la caracterización de determinados parámetros a través de técnicas de maximización de la expectativa (*EM*).

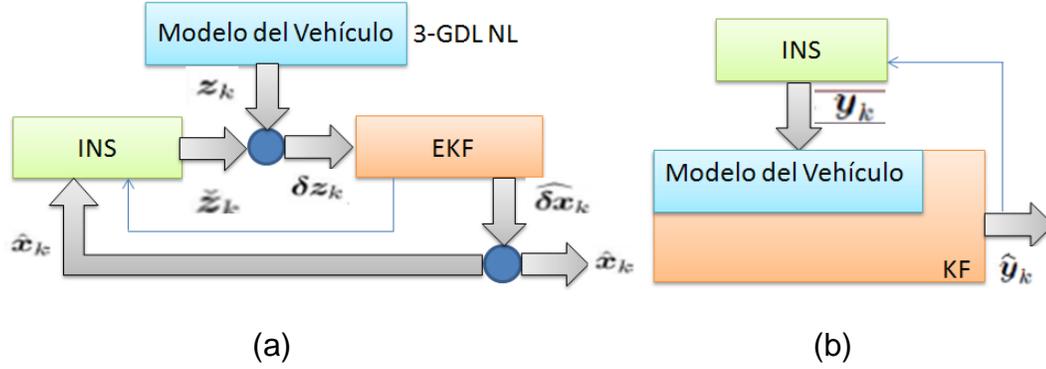


Figura 2-3. Estructura del sistema de navegación asistida. (a) Estrategia planteada en (Hegrenaes and Hallingstad 2011) y (b) Estrategia propuesta.

En la configuración propuesta en la figura 2-3b el modelo se constituye en el núcleo del observador a diferencia de lo planteado en la figura 2-3a donde este núcleo lo constituyen las ecuaciones del navegador. En la estructura propuesta el vector de estado está compuesto por:

$\mathbf{x}_k = [u_L \ v_L \ r_L \ x_L \ y_L \ \psi_L \ x_{h1} \ x_{h2} \ V_c]^T$  acorde a lo expresado en la ecuación (31).

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k+1} + \Gamma \mathbf{u}_{k+1} + \mathbf{E}_d \mathbf{w}_{hk+1} + \mathbf{W}_{Lk+1}$$

El vector de observación está dado por:

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{V}_k \quad (32)$$

donde

$$\mathbf{y}_k = [\mathbf{u}_{ib} \ \mathbf{v}_{ib} \ r \ x \ y \ \psi_c]^T \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

y  $\mathbf{V}_k$  es un vector de covarianza del ruido de las mediciones, con estructura diagonal y valores de acuerdo a las especificaciones de cada fabricante.

Los sensores instalados a bordo del CIDNAV-AUV son capaces de la medición de todos los componentes del vector de actitud  $\boldsymbol{\eta}_L$  (Martínez, Hernández et al. 2010),

gracias a la *IMU*. Los términos relacionados al vector  $v_L$  son más complejos de manejar, debido a los altos niveles de fluctuación y ruido en los giroscopios de la *IMU* y los errores inherentes del *INS*, pero factible. Dado que el sistema no tiene recursos para medir directamente la magnitud de las perturbaciones, debe confiar en la configuración previa a la misión, programada por el operador. Los componentes de actitud de 1er orden inducidos por las olas son añadidos a los componentes de movimiento de baja frecuencia del vehículo  $\eta$ . Esta perturbación introduce un comportamiento oscilatorio en todos los parámetros. Los componentes de velocidad inducidos por las corrientes son añadidos la variable  $v$ . El estado inicial de la matriz de covarianza del error del sistema asume que los mismos son independientes uno de otro.

El filtro de Kalman (*KF*) es una buena opción para la integración de los datos del modelo y el sistema de navegación inercial, bajo las suposiciones de una distribución de probabilidad Gaussiana como lo son los registros de salida del *DNVM* y del *INS*, contaminados con el ruido y dinámicas inciertas ( $W, V$ ) (Morgado, Oliveira et al. 2007; Aggarwal, Syed et al. 2010; Hegrenaes and Hallingstad 2011). El filtro de Kalman es un método robusto para estimar el estado de un proceso lineal estocástico, mediante la minimización del error medio cuadrático. El *KF* estima y propone la incertidumbre de los estados del sistema y las mediciones, mediante la utilización de un término de ganancia denominado ( $K$ ), siendo una matriz, que combina las incertidumbres del estado y las mediciones para calcular los estados actualizados del sistema. La figura 2-4 refleja el esquema básico de un observador donde las mediciones del sistema de navegación  $\psi_c, r, v_{ib}^b$  y  $p_{ib}^n$  a bordo del vehículo, son combinadas con un modelo de predicción para obtener un mejor estimado del estado del sistema. En nuestro caso este proceso incluye estimaciones de las perturbaciones marinas (magnitud de las corrientes y la influencia de las olas).

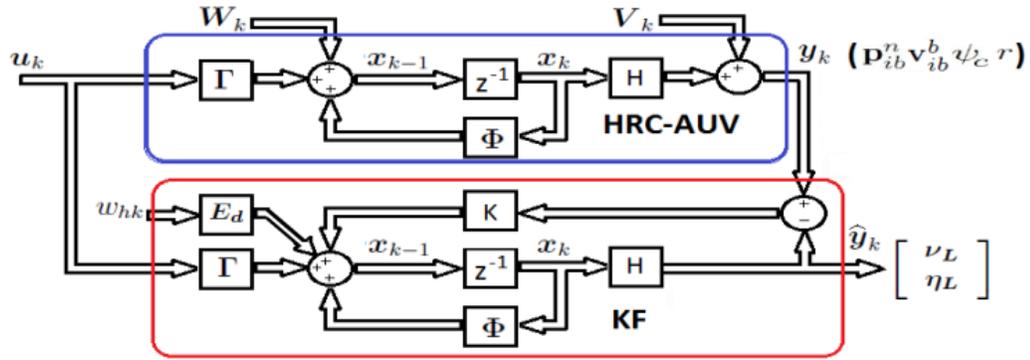


Figura 2-4. Estructura del observador.

### 2.4.1 Ecuaciones del filtro de Kalman

Es un algoritmo desarrollado por Rupert Kalman que sirve para poder estimar el estado no medible de un sistema dinámico lineal a partir de mediciones contaminadas con ruido blanco. Este método es recursivo y se utiliza para estimar el estado de un sistema lineal minimizando la media del error cuadrático. Es una herramienta para la estimación estocástica a partir de mediciones ruidosas de sensores (Welch and Bishop 2001).

Mediante el conocimiento del comportamiento actual, el filtro de Kalman estima el estado futuro del sistema aplicando un término de corrección proporcional al factor de predicción.

Par llevar a cabo el sistema primeramente se toma una medición inicial que está dada por:

$$\mathbf{x}_{k|k} \tag{33}$$

$$\mathbf{P}_{k|k} \tag{34}$$

#### Ecuaciones de Predicción.

Son responsables de la proyección del estado al momento “k+1” tomando como referencia el estado en el momento “k” y la actualización intermedia de la matriz de covarianza del error del estado estimado.

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k|k} + \mathbf{B}\mathbf{u}_t \tag{35}$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k|k}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (36)$$

Ecuaciones de actualización.

Son responsables de la retroalimentación, es decir, incorporan nueva información dentro de la estimación anterior con lo cual se llega a una estimación mejorada del estado.

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1|k}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_{k+1|k}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (37)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}(\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}) \quad (38)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1}\mathbf{H})\mathbf{P}_{k+1|k} \quad (39)$$

En la figura 2-5 se muestra el algoritmo recursivo del Filtro de Kalman.

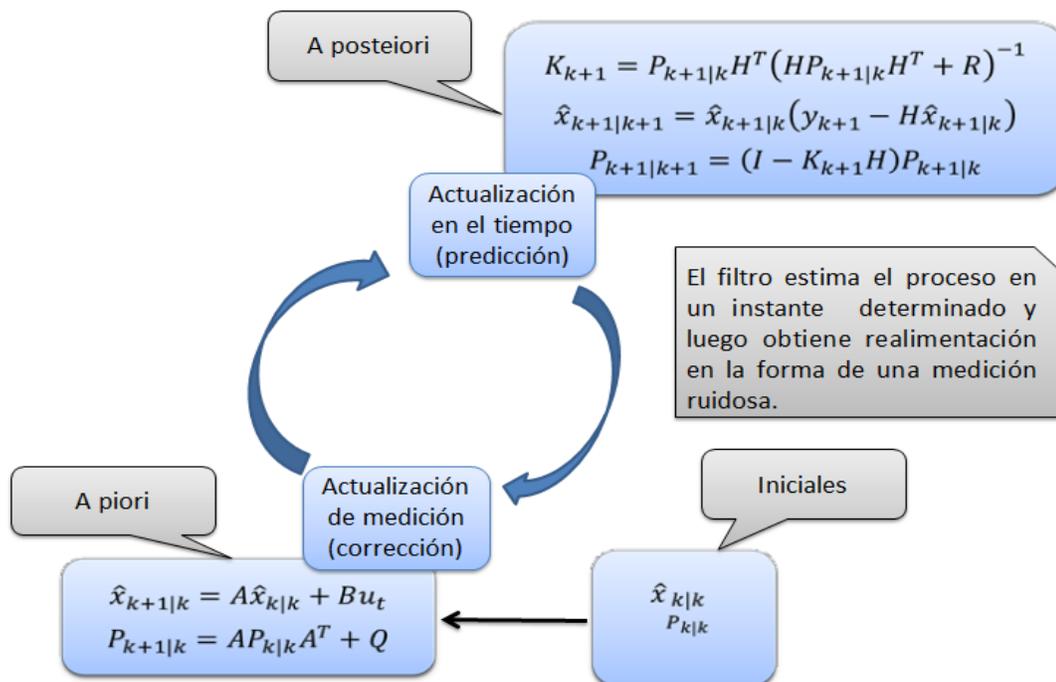


Figura 2-5. Algoritmo recursivo del Filtro de Kalman.

## **2.5 Consideraciones del capítulo.**

En este capítulo se partió del modelo dinámico de 6 GDL del HRC-AUV y de las perturbaciones medioambientales que inciden sobre el vehículo. A partir del modelo presentado se obtuvo un modelo reducido de 3 GDL linealizado de acuerdo a las condiciones de operación la cual se denominó DNVM. Este modelo linealizado será el empleado en el diseño del observador de la estrategia de fusión de información. Esperando que con este diseño se mejore la estimación de las distintas variables de estado del vehículo.

Además se presentó las ecuaciones del filtro de Kalman para producir una estimación óptima de los valores de las variables que describen el estado del sistema contaminado por el ruido.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Introducción

Para validar la estrategia propuesta se realizaron tres pruebas simuladas de seguimiento de trayectoria con la inclusión de perturbaciones marinas. Como primera prueba de evaluación, se generan un conjunto de puntos de control que reproducen una trayectoria de giros a  $\pm 90^\circ$  con una estrategia de guiado basada en línea de vista (*LOS*). Esta trayectoria es entonces proveída a los dos sistemas de navegación en comparación: *DNVM+KF* y *NLDM+EKF* (Figura 3-1). En el segundo experimento se mantiene la estrategia de guiado y son alteradas las magnitudes de las perturbaciones. Como tercer experimento se cambia la estrategia de guiado por un *spline* cúbico, manteniendo los mismos puntos de interés. Posteriormente los resultados de las pruebas son analizados mediante un test de significación estadística de Kolmogorov-Smirnov (*KS*) para muestras bivareadas. Este test brinda un estimado del grado relativo, en el cual se encuentra la posición estimada por las dos estrategias, dentro de un intervalo de confianza alrededor de la trayectoria deseada.

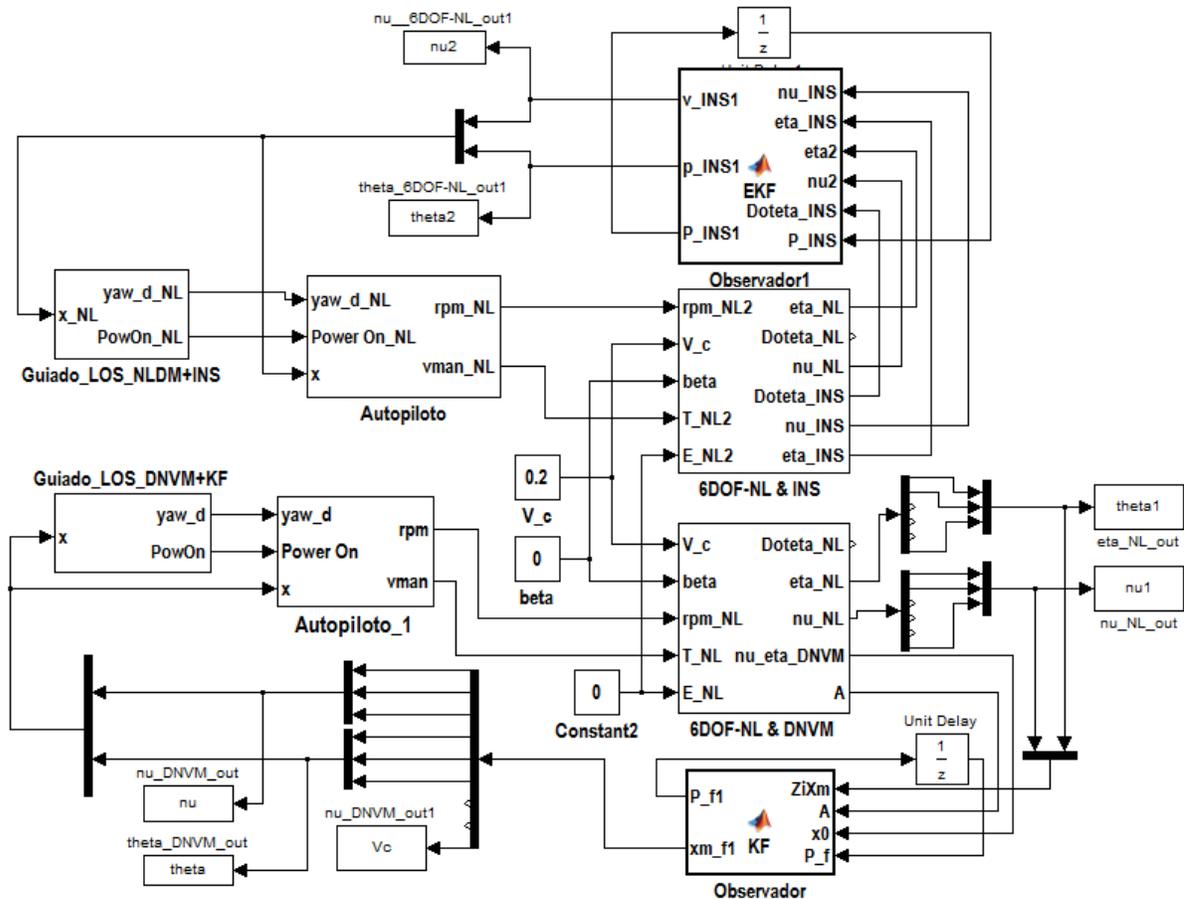


Figura 3-1. Estructura del sistema de simulación.

La prueba KS mide la distancia entre dos funciones de distribución acumulativa empírica con el fin de comprobar si han sido extraídas de la misma distribución. Para la implementación en el MATLAB, se incluye un argumento  $\alpha$ , lo que permite el muestreo del nivel de significación para rechazar la hipótesis nula.

Los resultados de la prueba son: (a) "pValue", que es un estimado para "P" de la prueba (Peacock 1983), un valor mayor al nivel de significancia seleccionado y se permite aceptar la hipótesis nula, y (b) "KSstatistic", que indica la distancia entre las dos muestras.

### 3.2 Primera prueba de evaluación

En este experimento simulado ambas estrategias fueron comparadas a través de un recorrido de 3 km, con sucesivos giros de  $\pm 90^\circ$ . Este tipo de maniobra fue seleccionado porque representa la maniobra más difícil planeada durante la operación. El sistema de propulsión es simulado con un valor medio de 500 rpm, dirección de la corriente  $0^\circ$  y con una magnitud de 0.2 m. La intensidad de las olas acorde con el mar de fuerza 2.

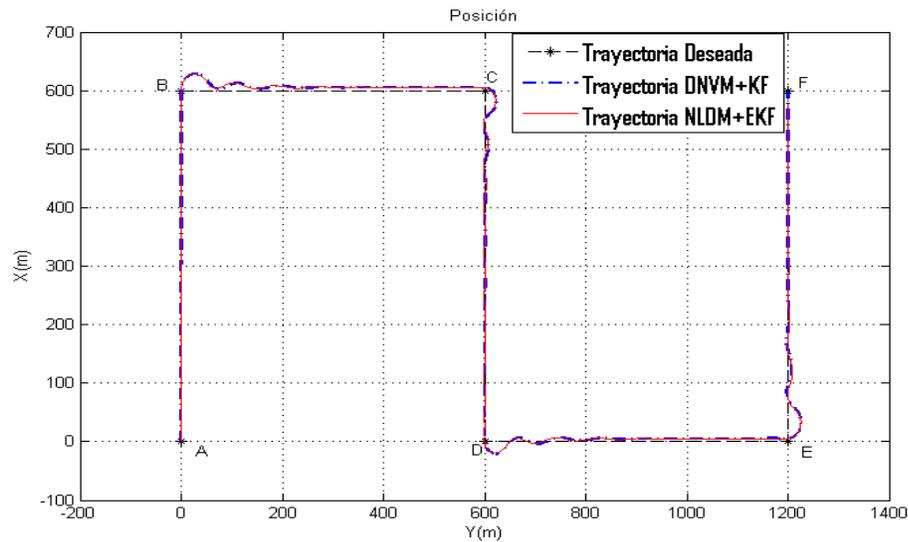


Figura 3-2. Posición estimada por ambas estrategias de fusión de información.

En la Figura 3-2 se muestra el comportamiento de la salida de posición de ambas estrategias de fusión de información. En la figura el sistema arranca en el punto A y va discurrendo a través de los puntos B, C, D, E y F. Se puede observar la alta similitud que existe entre ambos resultados. Pero para tener una medida más exacta de esta similitud, utilizaremos el test de Kolmogorov-Smirnov para comprobar la pertinencia entre las curvas y la trayectoria de control deseada. De igual forma contra la trayectoria de control mediremos error medio y desviación estándar. Los resultados de este análisis se pueden observar en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Resultados estadísticos de comparación entre las salidas de posición de las dos estrategias de fusión de información en análisis.

Estrategia	Error medio	Desviación estándar	pValue	KSStatistic
DNVM+KF	36.7494 m	19.1994 m	0.0887	0.2121
NLDM+EKF	43.3919 m	21.4162 m	0.0887	0.2121

Como se puede apreciar, ambas estrategias tienen un desempeño prácticamente similar con ligera ventaja para la de DNVM+KF. Consideramos que esto se debe a la mejor estimación de las perturbaciones introducidas en la simulación, en particular por la mejor estimación de la magnitud de la corriente. Para comprobar esta asunción realizaremos una segunda prueba de evaluación en la que ambos observadores serán inicializados con un error del 50% de la magnitud de la corriente.

### 3.3 Segunda prueba de evaluación

En esta prueba se simula el mismo recorrido presentado en la prueba 1, solo son alterados los valores de magnitud de corriente en la inicialización de los observadores (0.1 m/s en lugar del correcto 0.2 m/s). Para tener un patrón de comparación se corre una simulación sin introducir ruido a las mediciones de la planta.

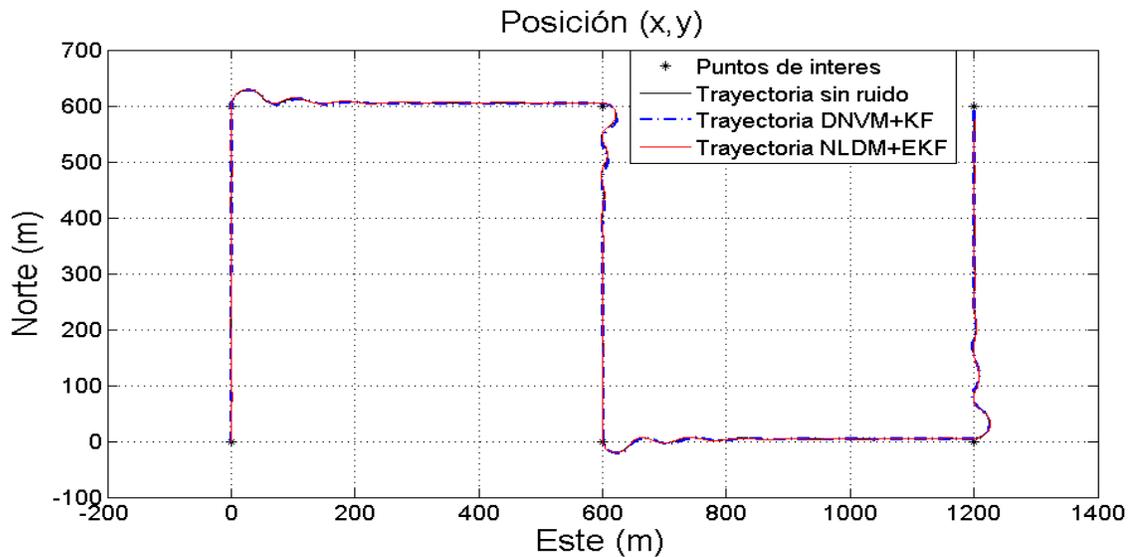


Figura 3-3. Posición estimada por ambas estrategias de fusión de información.

Como se puede observar nuevamente los resultados son prácticamente similares, para descubrir diferencias entre ambas estrategias un análisis de las velocidades en el plano del vehículo resulta indispensable.

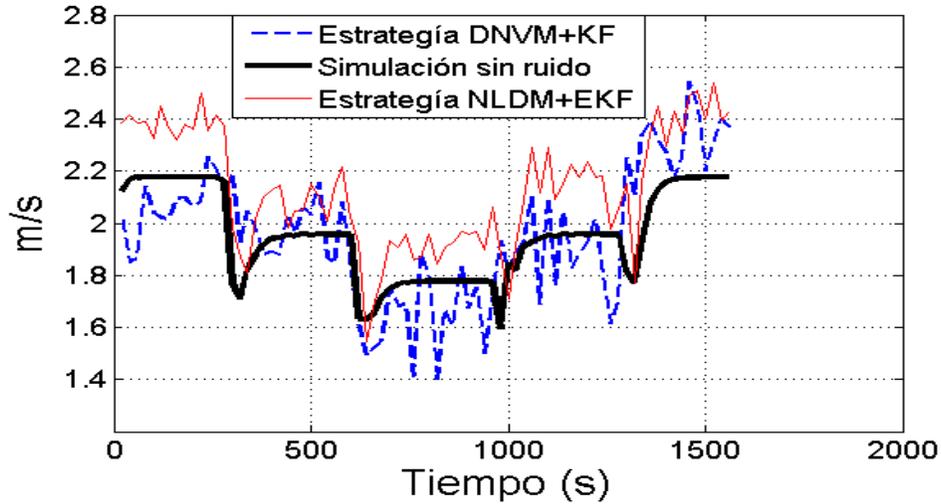


Figura 3.4: Velocidad  $u$  estimada por ambas estrategias.

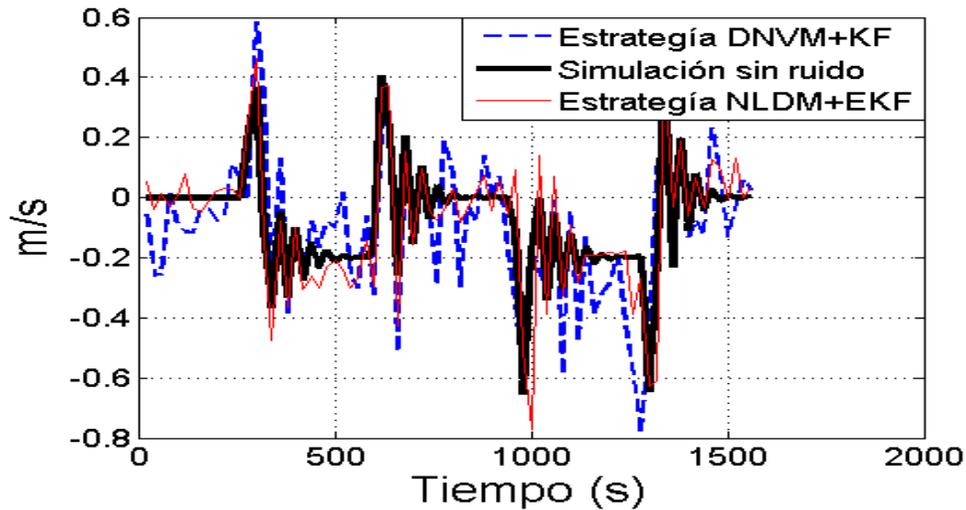


Figura 3-5. Velocidad  $v$  estimada por ambas estrategias.

Aquí si son visibles las diferencias en los resultados alcanzados por ambas estrategias. En las Figura 3-4 en particular se muestra que la peor estimación la brinda la configuración NLDM+EKF sobre el valor de  $u$ . Este error en gran medida lo podemos asociar en la demora al estimar la magnitud correcta de la corriente

$V_c$ . Si graficamos esta variable de estado del DNVM+KF, podremos comprobar como con cada actualización se aleja de la inicialización incorrecta para alcanzar un valor cercano al real.

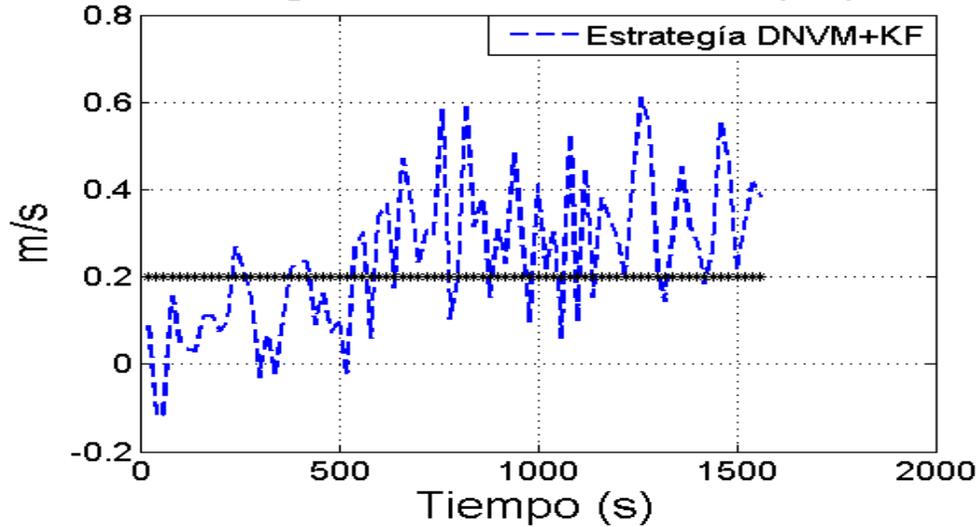


Figura 3-6. Magnitud de la corriente  $V_c$  estimada.

Si tomamos los resultados de la simulación sin ruido como los correctos es posible calcular el error medio y la desviación estándar alcanzado por las dos estrategias en análisis. Los resultados de esta comparación se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Resultados estadísticos de comparación entre las salidas de velocidad de las dos estrategias de fusión de información en análisis.

Estrategia	Velocidad	Error medio	Desviación estándar
DNVM+KF	u	0.1395 m/s	0.1079 m/s
	v	0.1465 m/s	0.1181 m/s
NLDM+EKF	u	0.1820 m/s	0.0863 m/s
	v	0.0856 m/s	0.1019 m/s

De igual forma estos valores estimados de  $u$  y  $v$  nos permiten realizar una estimación del ángulo de la corriente  $\beta$  (simulado con valor  $0^\circ$ ). A través de un simple cálculo de arcotangente entre las dos velocidades  $u$  y  $v$  (ecuación 40).

$$\beta = \tanh^{-1}(v/u) \quad (40)$$

A través de este cálculo la estrategia NLDM+EKF estima el ángulo  $\beta = -2.55^\circ$  mientras que la estrategia DNVM+KF estima  $\beta = -3.41^\circ$ . Ambos resultados se consideran muy buenos.

### 3.4 Tercera prueba de evaluación

En esta última prueba de evaluación mantenemos los mismos puntos de control, pero cambiamos la estrategia de guiado por un *spline* cúbico. Esta estrategia crea una trayectoria suave en la que el mando no se ve saturado y no se crean alinealidades. Para esta prueba, de igual forma ambos observadores son inicializados con valores incorrectos de magnitud de la corriente.

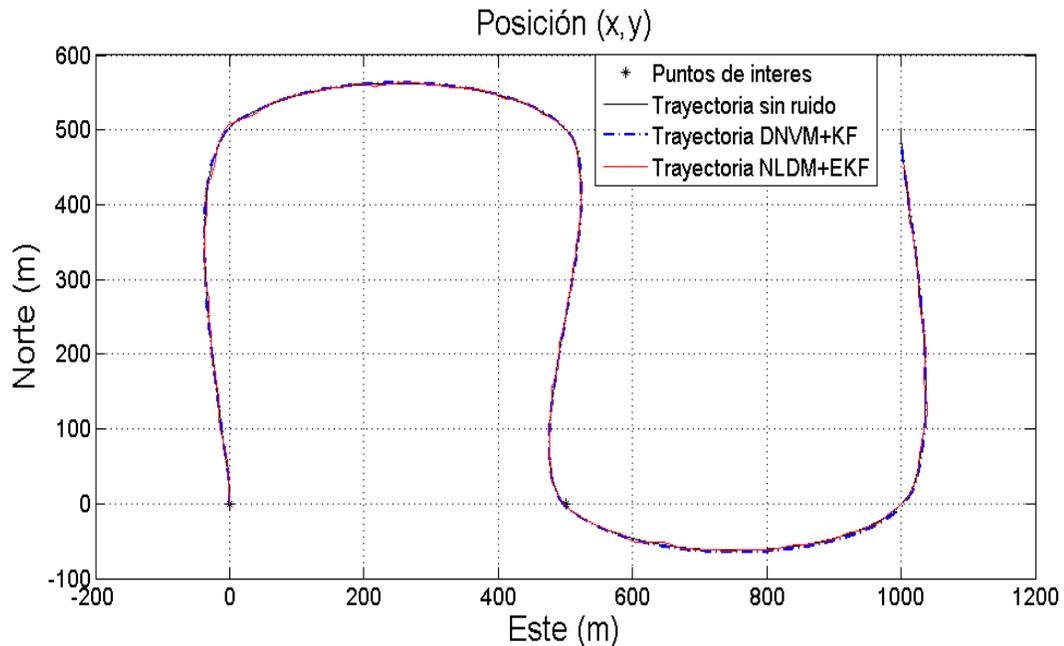
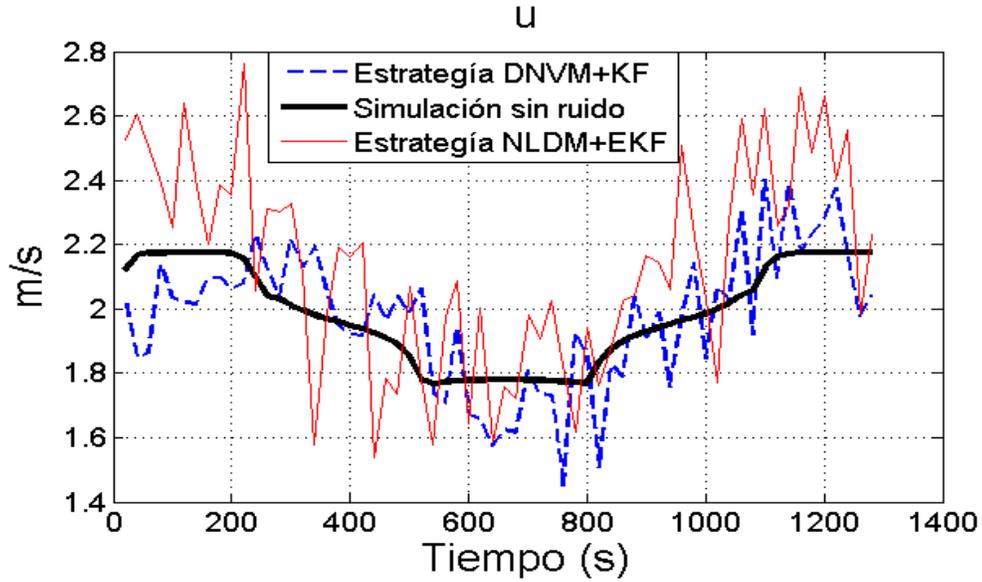
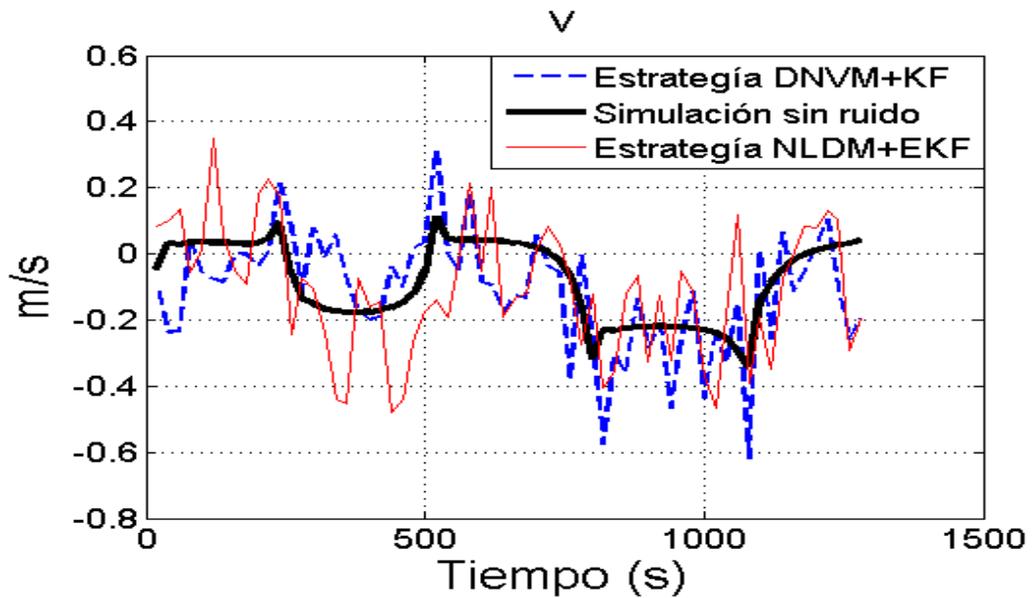


Figura 3-7. Posición estimada por ambas estrategias de fusión de información.

Como se puede apreciar en la figura 3-7 prácticamente no hay errores de seguimiento con respecto a la trayectoria deseada y nuevamente no hay diferencia práctica entre los resultados de ambas estrategias. Si realizamos la comparación en cuanto a las velocidades estimadas, podemos apreciar en las figuras 3-8 y 3-9 la similitud de los resultados.

Figura 3-8. Velocidad  $u$  estimada por ambas estrategias.Figura 3-9. Velocidad  $v$  estimada por ambas estrategias.

Esta mejora está relacionada con la desaparición de alinealidades en el mando, gracias a la estrategia de guiado. Un resultado comparativo de los resultados alcanzados lo podemos apreciar en la tabla 3-3.

Tabla 3-3. Resultados estadísticos de comparación entre las salidas de posición y velocidad de las dos estrategias de fusión de información en análisis.

Estrategia	Variable	Error medio	Desviación estándar
DNVM+KF	Posición	6.2655 m	3.8086 m
	$u$	0.1249 m/s	0.0845 m/s
	$v$	0.1207 m/s	0.0851 m/s
NLDM+EKF	Posición	30.6003 m	22.7885 m
	$u$	0.2270 m/s	0.1579 m/s
	$v$	0.1426 m/s	0.0914 m/s

De la tabla 3-3 podemos sacar como conclusión que para una trayectoria suave el sistema basado en el modelo lineal (DNVM) tiene mejor desempeño que su contraparte no lineal, con un error medio de posición 5 veces inferior. De igual forma podemos comprobar que la estimación de la magnitud y dirección de la corriente mejora nuevamente. La primera afirmación la podemos comprobar en la en la Figura 3-10 y la segunda mediante el empleo de la ecuación 40, nos permite estimar  $\beta$  acorde a: NLDM+EKF estima  $\beta = -3.68^\circ$ , mientras que la estrategia DNVM+KF la estima  $\beta = -2.9^\circ$  (simulación con  $\beta = 0$ ).

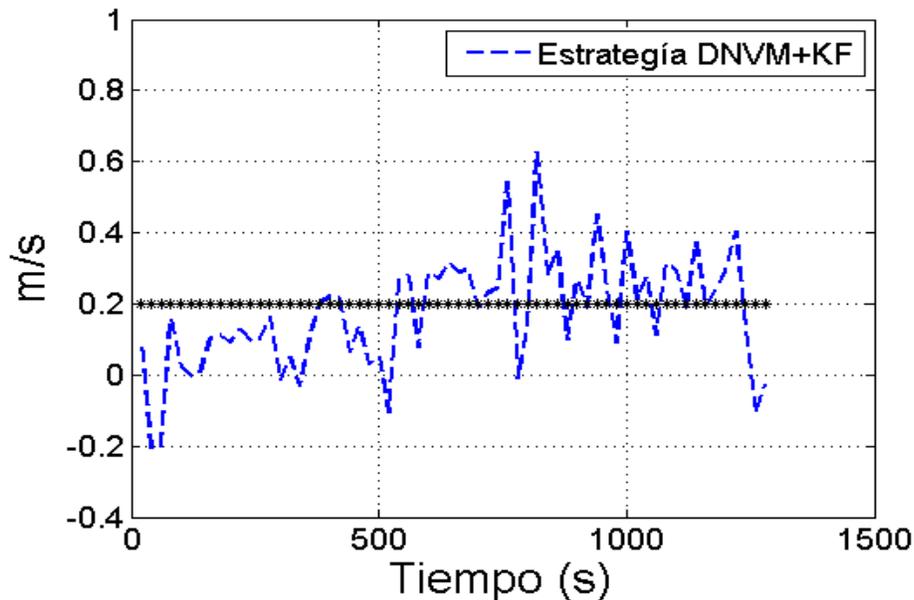


Figura 3-10. Magnitud de la corriente estimada.

### **3.5 Consideraciones del capítulo.**

Como se ha podido apreciar a lo largo de este capítulo la estrategia DNVM+KF se muestra como una alternativa viable ante la actualmente empleada NLDM+EKF. En el caso particular de seguimiento de trayectorias suaves su ventaja se acrecienta gracias a que estima con mayor exactitud la magnitud de la corriente y permite estimar con mayor exactitud su ángulo, factores ambos que redundan en una mejor estimación de posición.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de diploma, permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- 1 La estrategia propuesta tiene prestaciones similares o superiores a la actualmente empleada, basándonos en los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación.
- 2 La estrategia presentada está basada en un modelo lineal, esta permite el uso de otras técnicas como la de maximización de la expectativa (*EM*) que no podría ser empleada con el sistema no lineal.
- 3 La estrategia se probó en presencia de perturbaciones como la corriente de magnitud desconocida demostrando la robustez que tiene esta estrategia

### Recomendaciones

Como principales recomendaciones del presente trabajo se proponen:

- 1 Continuar desarrollando investigaciones dirigidas al perfeccionamiento del sistema de navegación.
- 2 Hacer el uso de técnicas de ME para caracterizar adecuadamente las matrices de covarianza, de ruido, de la planta y la medición.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aggarwal, P., Z. Syed, et al. (2010). MEMS-Based Integrated Navigation. Boston, Artech House.
- Antonelli, G. (2006). Fault Detection/Tolerance Strategies for AUVs and ROVs. Underwater Robots. B. Siciliano, O. Khatib and F. Groen. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag: 79-91.
- Antonelli, G., T. I. Fossen, et al. (2008). Handbook of Robotics. Chap. Underwater Robotics. Berlín, Alemania: 987–1008.
- Battle, J., P. Ridao, et al. (2004). URIS: Underwater Robotic Intelligent System. Automation for the Maritime Industries. J. Aranda, M. A. Armada and J. M. de la Cruz, Instituto de Automática Industrial: 177-203.
- Blidberg, D. (2001). The development of autonomous under water vehicles (auv). abrief summary.
- Bryson, M. and S. Sukkarieh (2006). Vehicle Model Aided Inertial Navigation for a UAV using Low-cost Sensors. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA), Canberra, Australia., IEEE Robotics and Automation Society
- Budiyono, A. (2009). "Advances in unmanned underwater vehicles technologies: Modeling, control and guidance perspectives." Indian J. Marine Sci 38(3): 282-295.
- Cañizares, J. R. (2010). Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba, Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas. Ingeniero.
- Desa, E., R. Madhan, et al. (2006). Potential of autonomous underwater vehicles as new generation ocean data platforms. 90: 1202–1209.
- Fernández, T., A (2012). Estrategia de control no convencional para un vehículo autónomo subacuático. Trabajo de diploma. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. UCLV. Santa Clara, Cuba.
- Fossen, T. I. (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles. N.Y, USA, John Wiley & Sons.

- Fossen, T. I. (2002). Marine control systems: Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles, Marine Cybernetics Trondheim, Norway.
- García-García, D., Y. Valeriano-Medina, et al. (2012). "Wave filtering for heading control of an AUV based on passive observer." IJMS 41: 540-549.
- García, D. (2010). Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba, Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas. Ingeniero.
- García, J. M., J. i. n. A. Almansa, et al. (2012). "Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control." Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI 9(3): 205-218.
- Hegrenaes, O., E. Berglund, et al. (2008). Model-aided inertial navigation for underwater vehicles. ICRA, IEEE.
- Hegrenaes, O. and O. Hallingstad (2011). "Model-Aided INS With Sea Current Estimation for Robust Underwater Navigation." IEEE, Oceanic Engineering 36(2): 316 - 337.
- Hegrenaes, O., O. Hallingstad, et al. (2007). "Towards Model-Aided Navigation of Underwater Vehicles." Modeling, Identification and Control 28(4): 10.
- Hegrenaes, O., O. Hallingstad, et al. (2007). A comparison of mathematical models for the HUGIN 4500 AUV based on experimental data. IEEE International Symposium on Underwater Technology (UT'07), Tokyo, Japan, IEEE Xplore.
- Isiyel, K. (2007). Autopilot Design And Guidance Control Of UlsarUuv (unmanned Underwater Vehicle). Electrical and Electronics Engineering. Ankara, Turkey, Middle East Technical University. M.Sc: 109.
- Kinsey, J. C., R. M. Eustice, et al. (2006). A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges. Maneuvering and Control of Marine Craft (MCMC2006), Lisbon, Portugal, IFAC.
- LaPointe, C. E. (2006). Virtual Long Baseline (VLBL) Autonomous Underwater Vehicle Navigation Using a Single Transponder. Department of Mechanical Engineering. Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology. Master of Science in Ocean Systems Management: 75.
- Lin, Z. and G. Wei (2004). The Experimental Study on GPS/INS/DVL Integration for AUV Position Location and Navigation Symposium. PLANS 2004, Monterey, USA, IEEE Xplore.
- Martínez, A., L. Hernández, et al. (2010). DISEÑO DE VEHÍCULO AUTÓNOMO AÉREO. V Conferencia Científica UCIENCIA 2010, La Habana, Cuba, UCI.
- Martínez, M. E. (2009). Desarrollo de sistemas de control para autopiloto de avión de pequeño porte. Trabajo de Diploma

- Morgado, M., P. Oliveira, et al. (2007). Vehicle Dynamics Aiding Technique for USBL/INS Underwater Navigation System. 7th Conference of Control Applications in Marine Systems, Bol, Croatia, IFAC.
- Peacock, J. A. (1983). "Two-dimensional goodness-of-fit testing in astronomy." Monthly Notices Royal Astronomy Society 202: 615-627.
- Pineda, L. M. (2009). Modelo matemático de un avión autónomo. Trabajo de diploma.
- Refsnes, J. E. G. (2007). Nonlinear Model-Based Control of Slender Body AUVs. Marine Technology. Trondheim, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, Trondheim, Norway .PhD: 244.
- Rodríguez, Y. and J. L. Ramos (2011). Sistema de software para supervisión y control de vehículo autónomo subacuático. La Habana.
- Sangekar, M., M. Chitre, et al. (2008). Hardware Architecture for a Modular Autonomous Underwater Vehicle STARFISH. OCEANS 2008 Quebec, Canada IEEE Xplore.
- Savage, P. G. (1998a). "Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 1: Attitude Algorithms." AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics 21(1): 19-28.
- Savage, P. G. (1998b). "Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part 2: Velocity and Position Algorithms." AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics 21(2): 208-221.
- Shin, E. H. (2005). Estimation techniques for Low-Cost Inertial Navigation. Department of Geomatics Engineering. Alberta, Canada, University of Calgary Doctor of Philosophy: 206.
- SNAME (1950). "Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid." 1-5.
- Sosa, R. (2010). Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba, Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas. Ingeniero.
- Sukkarieh, S., P. Gibbens, et al. (2000). "A Low-Cost, Redundant Inertial Measurement Unit for Unmanned Air Vehicles." The International Journal of Robotics Research 19(11): 1089-1103.
- Titterton, D. H. and J. L. Weston (2004). "Strapdown Inertial Navigation Technology." The Institution of Electrical Engineers and The American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Tuohy, S. T., J. J. Leonard, et al. (1996). "Map based navigation for autonomous underwater vehicles." International Journal of Offshore and Polar Engineering 6: 9-18.

- Valeriano-Medina, Y., A. Martínez, et al. (2012). "Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data." Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems.
- Welch, G. and G. Bishop (2001). An Introduction to the Kalman Filter. Chapel Hill, USA, University of North Carolina.
- Wernli, R. L. (2000). Auv commercialization-who's leading the pack? .SPAWAR Systems Center San Diego. California, Estados Unidos.
- Zamora, H. L. (2011). Control de trayectoria para el HRC-AUV considerando el efecto del oleaje y las corrientes marinas. Trabajo de diploma. Dpto.de Automática y Sistemas Computacionales. UCLV. Santa Clara, Cuba.