

## Vehículos Submarinos Autónomos

Jorge Cervantes<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

---

### Resumen

Más de dos terceras partes de la superficie del planeta Tierra están cubiertas de agua. Los océanos y los mares albergan una gran cantidad de especies de animales y de plantas formando ecosistemas con una gran biodiversidad. Además, estos representan una gran fuente de energías renovables y no renovables para el beneficio de los seres humanos.

La robótica submarina, representa una solución para resolver diversas tareas en ambientes subacuáticos sin la intervención de un operador humano. Durante las últimas décadas los vehículos submarinos autónomos han tenido un desarrollo notable y se han ido involucrando progresivamente en diversos ámbitos como lo son el científico, el comercial y el militar, enfrentando escenarios de operación cada vez más desafiantes. Gracias a los avances impresionantes desarrollados actualmente en los campos computacional, de tecnología de baterías, de la miniaturización de sistemas electrónicos y en una gran variedad de sensores de navegación, los vehículos submarinos autónomos se han convertido en dispositivos tecnológicos con mayores capacidades para desarrollar tareas autónomas. Esto permite poder plantear nuevos enfoques para dotar de autonomía (o inteligencia) a estos vehículos utilizando sistemas de procesamiento y toma de decisiones a bordo, llamados controladores. El diseño de los controladores obedece a la aplicación de técnicas y teorías matemáticas para cumplir con características de funcionamiento deseadas que los vehículos submarinos deben tener cuando desarrollan una tarea autónoma.

*Palabras Clave:* AUV, autonomía, submarino, modelado, control, seguimiento.

---

### 1. Introducción

La robótica submarina, representa una solución para resolver diversas tareas en ambientes subacuáticos sin la intervención de un operador humano. Durante las últimas décadas los vehículos submarinos autónomos (AUVs, del inglés, Autonomous Underwater Vehicles) han tenido un desarrollo notable y se han ido involucrando progresivamente en diversos ámbitos como lo son el científico, el comercial y el militar, enfrentando escenarios de operación cada vez más desafiantes. Gracias a los avances impresionantes desarrollados actualmente en los campos computacional, de tecnología de baterías, de la miniaturización de sistemas electrónicos y en una gran variedad de sensores de navegación, los AUVs se han convertido en dispositivos tecnológicos con mayores capacidades para desarrollar tareas autónomas. El desarrollo de los AUVs está dirigido a enfrentar principalmente escenarios de aplicación en donde la vida del ser humano puede estar en riesgo, así como reducir costos de implementación, mejorar la precisión en la localización geográfica de los vehículos y mejorar significativamente la eficiencia en su diseño. Lo anteriormente descrito permite poder plantear nuevos enfoques para dotar de autonomía (o inteligencia) a estos vehículos utilizando sistemas de procesamiento y

toma de decisiones a bordo, llamados controladores. Estos dispositivos interpretan la información de los sensores en tiempo real y generan señales de control para modificar el comportamiento de los vehículos submarinos.

En los años sesentas la marina de los Estados Unidos construyó un dispositivo submarino, el cual fue desarrollado para realizar operaciones de rescate y salvamento en el océano profundo (Wernli (2001)). En la década de 1970, el gobierno de los Estados Unidos y algunas universidades realizaron sus propias investigaciones con AUVs produciendo avances significativos en años posteriores. Algunos de los estudios tecnológicos motivaron al sector petrolero y de gas para implementar vehículos submarinos en yacimientos marinos (Williams (2004)). En la década de los ochentas varios vehículos autónomos fueron construidos para sumergirse a mayores profundidades sobrepasando los límites alcanzados por buzos de aguas profundas.

Sin embargo, debido a la depresión global ocurrida a mediados de esta década, la industria petrolera y el desarrollo de vehículos submarinos autónomos permaneció sin ningún progreso los siguientes años. Una vez más en la década de los noventa, surgió un nuevo interés relacionado con los AUVs sobre todo en el campo de la investigación académica. En von Alt (2003) se explica que estos avances se reflejaron finalmente en el desarrollo de nuevos diseños de vehículos submarinos por

parte de varias universidades. La investigación realizada previamente culminó en la construcción del primer AUV comercial en el año 2000 (Blidberg (2001)). A partir de ese momento, los AUVs se han desarrollado considerablemente (Smallwood et al. (1999)), (Griffiths and Edwards (2003)). Actualmente, los AUVs están siendo usados en un gran número de aplicaciones, por ejemplo: localizando naufragios como el Titanic (Ballard (1987)), mapeando el suelo marino (Tivey et al. (1998)), etc. Otras aplicaciones consisten en seguimiento de objetos (Kondoa and Ura (2004)), monitoreo de muelles, búsqueda de minas submarinas (Willcox et al. (2001)), y proyectos científicos (Curtin and Bellingham (2001)), (Rife and Rock (2002)), (Lygouras et al. (1998)). Recientemente, el diseño de baterías ha ayudado a incrementar el tiempo de alimentación autónoma de los AUVs (Wilson and Bales (2006)). También, nuevos avances tecnológicos han mejorado la eficiencia de los AUVs. Desde un punto de vista tecnológico el desarrollo de algoritmos para automatizar los vehículos submarinos también ha tenido un gran progreso los últimos años. En el campo del control automático aplicado en los AUVs, los problemas más comúnmente tratados en la literatura son: el control de profundidad, el control de posición traslacional, el control de orientación, seguimiento de trayectorias y seguimiento de puntos guía (Nakamura and Savant (1992), Egeland and Dalsmo (1996), Kinsey and Whitcomb (2007), Husa and Fossen (1997), Refsnes et al. (2008), Aguiar and Pascoal (2007)).

Específicamente, el seguimiento de trayectoria, que trata con el problema de maniobrar el vehículo para seguir una ruta deseada, representa un problema que en general no es fácil de resolver. Lo anterior, debido a que el sistema de los AUVs presenta un comportamiento altamente no lineal con múltiples incertidumbres paramétricas y bajo el efecto de perturbaciones externas como oleajes y corrientes marinas. Investigaciones recientes que tratan con este problema aplican técnicas de control avanzado como: modos deslizantes (Elmokadem et al. (2015), Joe et al. (2014)), control no lineal (Bian et al. (2010), He-ming et al. (2012)), control adaptable (Kumar and Subudhi (2014), Rezazadegan and Shojaei (2013)), redes neuronales (Eski and Yildirim (2014), Wang and Wang (2014)), control difuso (Lakhekar and Waghmare (2015), Raimondi and Melluso (2010)).

Otros trabajos propuestos por la comunidad científica para resolver el problema de seguimiento de trayectorias pueden verse en Gan et al. (2017). Estudios como el presentado en Chen et al. (2017) donde se propone una ley de control que combina un controlador por modos deslizantes con un algoritmo difuso adaptable para el seguimiento de trayectoria de un modelo horizontal de un vehículo submarino subactuado. El algoritmo adaptable se encarga de compensar las perturbaciones paramétricas mientras que los modos deslizantes eliminan los efectos de las perturbaciones del ambiente. También en el trabajo desarrollado por Song et al. (2018), se resuelve el problema de seguimiento en el plano horizontal de un vehículo submarino, haciendo que el error de seguimiento converja utilizando solamente la fuerza en la dirección del eje X y el momento en la dirección de yaw. Un filtro pasa bajas es utilizado para compensar el efecto de la masa agregada y de la fuerza de amortiguamiento hidrodinámico. En Jiang et al. (2018) se diseñan

dos controladores para resolver el seguimiento de trayectoria horizontal de un vehículo submarino: un controlador cinemático diseñado usando la técnica de backstepping y un controlador dinámico basado en modos deslizantes integrales globales para estabilizar los errores de velocidad y en consecuencia los errores de posición. En el estudio reportado por Liu et al. (2019) se propone una estrategia de control basada en un sistema en lazo cerrado virtual para generar una trayectoria de referencia para el vehículo submarino. Un controlador robusto basado en una función de saturación generalizada en combinación con una estimación por redes de neuronales permiten que el vehículo siga la trayectoria virtual generada.

En el presente trabajo se presenta un panorama general acerca del estudio de los vehículos submarinos autónomos, desde el punto de vista de su clasificación, componentes principales para su funcionamiento, modelado matemático y por último diseño de leyes de control para dotarlo de autonomía.

La organización del artículo se presenta a continuación: La Sección 2, presenta la clasificación de los vehículos submarinos no tripulados. Los componentes principales de los vehículos submarinos autónomos se describen en la Sección 3. En la sección 4, se explica el modelo matemático de los vehículos submarinos. En la sección 5, se define el sistema de guiado, navegación y control para vehículos submarinos. En la sección 6, se presenta un controlador de seguimiento de trayectorias para un vehículo submarino usando técnicas de control no lineales. En la sección 7 se presentan algunas conclusiones finales.

## 2. Clasificación de los Vehículos Submarinos no Tripulados

En esta sección se presenta una clasificación general de los vehículos no tripulados. Los vehículos submarinos no tripulados (UUVs, del inglés, Unmanned Underwater Vehicles) pueden clasificarse de varias maneras, por ejemplo, de acuerdo a su capacidad de realizar tareas autónomas, a la forma de su estructura, o por su manera de propulsarse, etc (ver Figura 1).

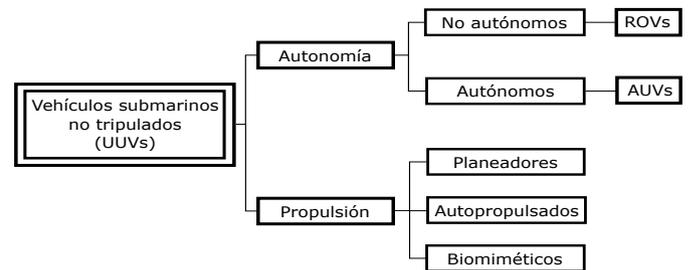


Figura 1: Clasificación de vehículos submarinos no tripulados.

Los vehículos submarinos no tripulados se clasifican por su nivel de autonomía, como vehículos submarinos no-autónomos y vehículos submarinos autónomos. Los primeros son conocidos también como vehículos submarinos remotamente operados (ROVs, del inglés, Remotely Operated Vehicles), los cuales necesitan de una operación manual para la realización de maniobras. Estos vehículos están comunicados con la superficie



(a) Vehículo submarino remotamente operado SEAEYE. Imagen cortesía de SAAB en <https://www.saabseeye.com/solutions/underwater-vehicles/falcon>.



(b) Vehículo submarino autónomo REMUS 6000. Imagen cortesía de Kongsberg Maritime en <https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-remus-6000/>.

Figura 2: Vehículo submarino no tripulados por su nivel de autonomía

a través de cables para intercambiar información y alimentar al robot. En una estación de control en la superficie un operador envía comandos de movimiento para maniobrar el vehículo. El vehículo transmite la información de los sensores (como cámaras, sensores de temperatura, presión, salinidad, etc) a la estación en la superficie. Estos vehículos están equipados principalmente con: cámaras, motores para propulsarse, sistemas de iluminación, pinzas robóticas, cable de comunicación, etc. Los ROVs son utilizados ampliamente por las industrias petroleras para realizar inspecciones de las estructuras de las plataformas de extracción o también para exploración del fondo marino y de rescate de naufragios que se encuentran sumergidos en el mar. En la Figura 2 (a), se muestra el vehículo remotamente operado SEAEYE de la marca SAAB.

Por otro lado, los vehículos submarinos autónomos (AUVs, del inglés, Autonomous Underwater Vehicles) son vehículos autopropulsados capaces de realizar actividades simples con poca o nula supervisión humana. Los AUVs están equipados con sistemas embebidos de electrónica compuestos por una computadora y un sistema independiente de alimentación. Estos submarinos no requieren una línea de comunicación para intercambiar datos con la superficie, dado que ejecutan tareas preprogramadas para realizar misiones definidas previamente. Los AUVs se utilizan en situaciones donde los cables de los ROVs limitan el alcance de las tareas y la movilidad de los vehículos. Los submarinos autónomos se emplean para diversas tareas como la exploración oceanográfica, mapeo del suelo marino, detección y desactivación de minas, etc. La información de interés recopilada durante las misiones se almacena en

un registro interno para poder analizarse posteriormente. En la Figura 2 (b) se muestra el vehículo REMUS 6000 de la marca noruega Kongsberg Maritime utilizado para investigación marina y aplicaciones comerciales.

Los vehículos submarinos no tripulados también pueden clasificarse por la manera en que son propulsados, dentro de los más importantes destacan: los planeadores submarinos (o *gliders*, del inglés), los submarinos autopropulsados y los submarinos con locomoción biomimética. Los planeadores submarinos se desplazan convirtiendo el movimiento vertical en horizontal cambiando su flotabilidad y planeando con unas alas integradas en su estructura, obteniendo un sistema de propulsión de bajo consumo energético con el que pueden recorrer grandes distancias bajo el agua. En la Figura 3(a) puede observarse el planeador SEAGLIDER de la marca Kongsberg Maritime.

El perfil de movimiento desarrollado por este tipo de vehículos tiene forma de diente de sierra debido a su mecanismo de propulsión, a lo largo del cual realiza mediciones de las características del agua como la temperatura, la conductividad (que permite conocer la salinidad), las corrientes oceánicas, el nivel de clorofila, etc.

Por otro lado, los submarinos autopropulsados utilizan mecanismos tales como propelas e impulsores para moverse por sí mismos a través del agua. Estos vehículos tienen una capacidad de carga mayor que los submarinos planeadores, permitiéndoles ejecutar misiones que requieren tiempos prolongados de funcionamiento, incluso varios días. Estos, están equipados con un conjunto de sensores para realizar diversos tipos de mediciones y observaciones de interés para varias disciplinas científicas. En la Figura 3 (b) se muestra el vehículo autopropulsado DOUBLE EAGLE SAROV de la marca SAAB, cuyo sistema de propulsión favorece la realización de tareas de detección de objetos submarinos.

Por último, los submarinos biomiméticos, son aquellos que emulan la propulsión acuática de sistemas biológicos, como peces, tortugas, pingüinos o serpientes. Por ejemplo, algunos peces pueden conseguir una eficiencia en su propulsión mayor al 90 por ciento, además de poder maniobrar bajo el agua con mayor facilidad que con cualquier submarino construido por el hombre. Una de las mayores ventajas es que su movimiento produce menos ruido y agitación en el agua, lo que los hace adecuados para estudiar sistemas biológicos sin perturbar el entorno. Algunos ejemplos son el pez robótico *SoFi* (vea la Figura 3 (c)) desarrollado en el Laboratorio de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la MIT, o el *AquaPenguin*, de la marca Festo de Alemania.

### 3. Componentes de los AUVs

En esta sección, se presentan los componentes principales que conforman el *Hardware* de los vehículos submarinos autónomos, dentro de los más importantes resaltan los siguientes:

- Sensores
- Unidades de Procesamiento
- Dispositivos de Comunicación



(a) Planeador submarino *SEAGLIDER*. Imagen cortesía de Kongsberg Maritime en <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/documents/399038-seaglider-brochure.pdf>.



(b) Vehículo submarino *DOUBLE EAGLE SAROV*. Imagen cortesía de SAAB en <http://www.marinevision.es/es/diving-pro/saab/mil-deagle-sar.html>.



(c) Robot submarino *SoFi*. Imagen cortesía del MIT en <http://news.mit.edu/2018/soft-robotic-fish-swims-alongside-real-ones-coral-reefs-0321>.

Figura 3: Vehículo submarino no tripulados por su nivel de autonomía

- Fuentes de Alimentación
- Propulsores

### 3.1. Sensores

Para poder desarrollar una tarea automática el vehículo necesita conocer su posición bajo el agua y la orientación que guarda con respecto al marco fijo a la Tierra. Esta información es proporcionada por un sistema de sensado embebido en el vehículo. Los dispositivos embebidos usados generalmente son:

**Unidades de medición inercial.** Las IMU (del inglés, Inertial Measurement Unit) son dispositivos que integran acelerómetros, giróscopos y magnetómetros junto con algoritmos de fusión de datos para generar mediciones de las tres posiciones angulares y de las tres velocidades angulares del vehículo.

**Sensores de profundidad.** Los dispositivos que se utilizan para determinar la profundidad en la que se encuentra el vehículo, son conocidos como barómetros. Estos dispositivos se basan en el registro de la presión ejercida por la columna de agua que

se encuentra sobre el sensor más la presión atmosférica. Considerando factores como la temperatura y la densidad del agua es posible realizar un cálculo preciso de la profundidad a la que se encuentra un objeto bajo el agua. La mayoría de estos dispositivos se basan en sistemas micro electromecánicos (*MEMS*, por sus siglas en inglés).

**Sensor de velocidad de efecto Doppler.** Los DVL (del inglés, Doppler Velocity Log) son sensores acústicos que estiman la velocidad relativa al suelo marino. Esto se logra mandando un pulso largo con un mínimo de tres haces acústicos, cada uno apuntando a una dirección diferente. Típicamente, esto produce estimados de la velocidad convertidos a un marco de referencia con coordenadas XYZ (El marco de referencia del DVL).

**Sistema de posicionamiento global.** Los GPSs (del inglés, Global Positioning System), son dispositivos utilizados para determinar su localización, cuando estos se encuentran en la superficie del agua. También son utilizados por embarcaciones en la superficie para proporcionar una posición geo-referencia a los vehículos submarinos mediante señales acústicas.

**Sistema de navegación por sonido y rango.** Los sonares (del inglés, Sound Navigation and Ranging) se utilizan para detección de obstáculos bajo el agua. El sonar activo se compone de un emisor de sonido (*pinger*, del inglés) y un receptor (o hidrófono). El *pinger* genera un pulso de sonido (o *ping*) y el hidrófono recibe la reflexión (o eco) del mismo. De acuerdo a la diferencia de tiempo entre la emisión de la señal acústica y la recepción del eco puede calcularse la distancia a la que se encuentra un objeto.

**Sistema de posicionamiento acústico.** Este sistema calcula la distancia que existe entre un transductor montado en el vehículo submarino y otros transductores en localizaciones conocidas con espaciados conocidos. Este sistema permite obtener un cálculo preciso de la distancia calculando el tiempo de vuelo de ida y vuelta. La orientación se resuelve a través de la triangulación de las diferencias de tiempo que se obtienen a lo largo de un arreglo de transductores. Los principales sistemas de localización acústica son:

- Sistemas de Base Larga
- Sistemas de Base Corta,
- Sistemas de Base Ultra-Corta

En los sistemas de base larga, los hidrófonos se encuentran instalados en el fondo oceánico dentro de un área de interés en donde maniobrará el vehículo submarino. Los sistemas de base corta y ultra-corta se utilizan para comunicar vehículos submarinos con vehículos de superficie. El submarino tiene un transpondedor (transmisor y respondedor) y la embarcación de superficie cuenta con un emisor y un arreglo de receptores.

**Sistema de Visión.** Uno de los principales objetivos de las cámaras en los vehículos submarinos es tomar fotografías o videos durante tareas de exploración para realizar un análisis posterior de los datos capturados. Por otro lado, los sistemas de visión también son utilizados para poder obtener estimados de la velocidad de los vehículos utilizando flujo óptico. Este método se basa en considerar el cambio de posición de ciertas características en el plano imagen con respecto al tiempo para

determinar un estimado de la velocidad. Otra aplicación que recientemente ha tenido mucho auge, es la localización, mapeo y navegación simultánea (*SLAM*, por sus siglas en inglés). Esta técnica permite realizar tareas de navegación en escenarios donde los submarinos se encuentran en ambientes no estructurados, es decir que no se conocen previamente. Sin embargo los sistemas de visión en general se ven limitados por la factores como la turbiedad del agua y la iluminación, que dificultan obtener imágenes nítidas para ser procesadas o analizadas. Es por esta razón, que otro tipo de tecnologías son utilizadas para poder obtener imágenes submarinas, utilizando, por ejemplo, señales acústicas puesto que la este tipo de señales no presentan una atenuación significativa cuando se propagan por el medio marino.

### 3.2. Unidades de Procesamiento

En general los vehículos submarinos autónomos están equipados con dispositivos, conocidos como pilotos automáticos (*AP*, por sus siglas en inglés), éstos realizan la adquisición y procesamiento de la información proveniente de los múltiples sensores de navegación, permitiendo obtener estimados tanto de orientación como de posición del vehículo, y determinar cual será su trayectoria ejecutando las instrucciones correspondientes. La mayoría de los pilotos automáticos están equipados con IMUs junto con sistemas de navegación inercial (*INS*, por sus siglas en inglés) para realizar fusión de datos y mejorar la calidad de las mediciones. Actualmente, existen una gran variedad de APs comerciales que se diferencian por su peso, tamaño, costo, capacidad computacional, equipamiento de sensores y conexión con periféricos. Dentro de los que destacan están los APs de 32 bits tales como: Pixhawk, Ardupilot, PX4, etc, que son dispositivos denominados de código abierto. También es común, interconectar los autopilotos con algún tipo de computadora de alto nivel con el objetivo de realizar tareas que involucren un mayor costo computacional como lo son las denominadas computadoras embebidas. Al igual que los APs, existen diversas opciones de computadoras embebidas en el mercado de tamaño y peso reducido, memoria interna, y con capacidades de comunicación amplia mediante los protocolos: Ethernet, USB, bluetooth, radio frecuencia, entre otros. Dentro de las microcomputadoras más utilizadas están las que están basadas en procesadores ARM como: Raspberry Pi, Beaglebone, Odroid, etc. Estas computadoras son capaces de realizar tareas como captura de vídeo e imágenes, procesamiento de imágenes en tiempo-real, programación de rutinas autónomas complejas, etc.

### 3.3. Dispositivos de Comunicación

Como ya se mencionó anteriormente, para poder intercambiar datos entre un vehículo de superficie y un submarino es necesario un cable de comunicación entre ambos. Los sistemas de comunicación estándar utilizan señales de radio con un alcance muy limitado, debido a que este medio acuático no favorece la propagación de este tipo de señales. Sin embargo, a diferencia de la señales de radio, las señales acústicas se propagan con facilidad en el agua con una baja atenuación. Las

señales acústicas pueden utilizarse para establecer un sistema comunicación mediante el uso de dispositivos conocidos como módems acústicos. Estos dispositivos tienen un funcionamiento parecido a los módems que trabajan con señales de radio, pero usando ondas acústicas. Con estos dispositivos pueden instalarse sistemas de comunicación bajo el agua con varios miles de metros de alcance y velocidades de comunicación que rondan los 27.7 kbits por segundo. La comunicación puede establecerse entre un submarino con un vehículo de superficie o colocar un arreglo de módems en el fondo marino para comunicar varios vehículos submarinos entre sí. Otra alternativa de comunicación, es a través de dispositivos llamados sonoboyas, éstos dispositivos se encuentran en la superficie y están unidos al submarino mediante un cable de comunicación. En esta configuración el vehículo de superficie se comunica con la boya mediante señales de radio y esta información es transmitida posteriormente al submarino mediante el cable de comunicación.

### 3.4. Fuentes de Alimentación

La fuente de energía es un componente primordial para el funcionamiento de los AUVs, y su selección depende de varios aspectos como: la duración de su carga, su tamaño, su capacidad de descarga, etc. Las fuentes de energía más comunes son las baterías, cuya estructura está compuesta de varias celdas que transforman la energía química en energía eléctrica. Las baterías que utilizan los vehículos autónomos tienen la característica de que son recargables y las más comúnmente usadas con las baterías tipo LiPO (Polimero de Litio), Li-Ion (Ion de Litio), Ni-Mh (Niquel Metal Hidruro), LiFePO (Litio-Ferrosfato).

### 3.5. Propulsores

Los submarinos autónomos se desplazan en el agua gracias a sistemas de propulsión. Estos sistemas de propulsión generan las fuerzas que producen el movimiento utilizando propelas e impulsores, aletas o sistemas de lastre. Los sistemas de propulsión mayormente utilizados por los AUVs son los impulsores de propelas, que consisten de un motor eléctrico acoplado con una propela. El efecto de empuje se produce cuando giran las propelas y estas desplazan el fluido circundante. La representación matemática para el empuje producido por el impulsor es la siguiente:

$$E = K\omega^2 \quad (1)$$

donde  $E$  es el empuje producido,  $\omega$  es la velocidad angular de la propela, y  $K$  es una constante de proporcionalidad.

También es posible dotar al vehículo con varios impulsores, para incrementar la maniobrabilidad del vehículo y en consecuencia posea más grados de libertad. Esta configuración se utiliza principalmente para tareas que requieren precisión en los movimientos y donde los desplazamientos en los diferentes grados de libertad puedan manipularse de manera desacoplada. Otra configuración consiste en impulsores pivotantes, esto es el vehículo es capaz de orientar los impulsores de acuerdo al movimiento que se desee producir. Esto es el vehículo puede

desplazarse y orientarse con un número limitado de impulsores. Este sistema de propulsión incrementa la maniobrabilidad del vehículo, sin embargo la descripción matemática de este tipo de configuración es más compleja de representar.

#### 4. Modelo Matemático de Vehículos Submarinos

En esta sección se presenta el modelado matemático de vehículos submarinos que describen su cinemática y los principales fenómenos físicos que representan su dinámica (vea Fossen (2002)). Antes de describir el modelo matemático es necesario primero definir dos marcos de referencia marcos de referencia para poder describir el movimiento de vehículos submarinos. Los marcos coordenados de referencia más comúnmente usados son:

- Norte-Este-Abajo (*NED*, por sus siglas en inglés),
- Fijo al Cuerpo

El marco de referencia NED, denotado por  $O_n x_n y_n z_n$ , considera que el eje  $x_n$  apunta hacia el norte, el eje  $y_n$  apunta hacia el Este, y el eje  $z_n$  apunta hacia abajo. Si consideramos este marco de referencia, entonces el movimiento que realiza un submarino para sumergirse se considera como positivo. Por su parte, el marco fijo al cuerpo, denotado por  $O_b x_b y_b z_b$ , es aquel que se mueve junto con el vehículo. En general, se asume que el origen de este sistema de coordenadas coincide con el centro de gravedad del vehículo, esto es el vector  $r_g^b$  que los conecta es  $r_g^b = (0, 0, 0)$ , y los ejes  $x_b$ ,  $y_b$  y  $z_b$  se hacen coincidir con eje principales de inercia. El eje  $x_b$  apunta hacia el frente del vehículo, el eje  $y_b$  apunta a estribor y el eje  $z_b$  apunta hacia abajo. La notación usada en la literatura de vehículos marinos es la propuesta por la Sociedad Naval de Arquitectos e Ingenieros Marinos (SNAME (1950)), denotando las posiciones lineales y angulares con respecto al marco NED como:  $(x, y, z)$  y  $(\phi, \theta, \psi)$ , velocidades lineales y angulares respecto al marco fijo al cuerpo como:  $(u, v, w)$  y  $(p, q, r)$ , y las fuerzas y momentos con respecto al marco fijo al cuerpo como:  $(X, Y, Z)$  y  $(K, M, N)$ .

El siguientes conjunto de ecuaciones diferenciales describen el comportamiento dinámico del los vehículos submarinos:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{w} \quad (2a)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \quad (2b)$$

donde  $\mathbf{M}$  es la matriz de inercia del sistema,  $\mathbf{C}(\mathbf{v})$  el matriz de Coriolis y términos centrípetos,  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$  es la matriz de amortiguamiento hidrodinámico,  $\mathbf{g}(\mathbf{v})$  es el vector de fuerzas y momentos de restauración,  $\boldsymbol{\tau}$  el vector de entradas de control, y  $\mathbf{w}$  el vector de perturbaciones ambientales,  $\boldsymbol{\eta} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  es el vector de posiciones generalizadas,  $\mathbf{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$  es el vector de velocidades generalizadas, y  $\boldsymbol{\tau} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$  es el vector de fuerzas y momentos generalizados. Las ecuaciones (2b) representan la relación geométrica entre el vector de velocidades generalizadas y la tasa de cambio del vector de posiciones generalizadas con respecto al tiempo. La matriz  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$  tiene la siguiente forma:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\phi, \theta, \psi) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T}(\phi, \theta, \psi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde

$$\mathbf{R}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

y

$$\mathbf{T}(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} 1 & -s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde se utiliza la notación simplificada  $s(\cdot) = \sin(\cdot)$  y  $c(\cdot) = \cos(\cdot)$  para las funciones sinusoidales y cosenoidales de los ángulos  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$ .

La estructura del modelo (2a) es similar al modelo utilizado comúnmente en robótica de manipuladores Spong et al. (2005), Kelly and Santibanez (2003). Sin embargo, el modelo (2a) expresa la dinámica del vehículo con respecto al cuerpo. Además, las matrices de inercia y de Coriolis incluyen un efecto conocido como masa agregada, el cual se presenta cuando un objeto se desplaza a través del agua. También existe un efecto de amortiguamiento que no es despreciable debido a que la densidad del agua es mucho mayor en comparación con la del aire, dicho efecto es añadido en la ecuación a través de la matriz  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ . Otra diferencia tiene que ver con el vector  $\mathbf{g}(\mathbf{v})$ , ya que además de incluir el efecto de la gravedad también contempla la fuerza de flotabilidad y sus momentos producidos.

La matriz de inercia puede representarse de la siguiente forma:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \quad (6)$$

donde

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

es la matriz de inercia del cuerpo rígido,  $\mathbf{I}_c = \text{diag}\{I_x, I_y, I_z\}$ ,  $m$  es la masa del vehículo y  $\mathbf{M}_A = -\text{diag}\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\}$  es la matriz inercia debida a la masa agregada considerando que el vehículo se mueve a bajas velocidades y tiene tres ejes de simetría. Los elementos de la matriz  $\mathbf{M}_A$  se definen de la siguiente forma según la notación de la usada en (SNAME,1950):

$$\begin{aligned} X_{\dot{u}} &:= \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}, Y_{\dot{v}} := \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}}, Z_{\dot{w}} := \frac{\partial Z}{\partial \dot{w}}, \\ K_{\dot{p}} &:= \frac{\partial K}{\partial \dot{p}}, M_{\dot{q}} := \frac{\partial M}{\partial \dot{q}}, N_{\dot{r}} := \frac{\partial N}{\partial \dot{r}} \end{aligned} \quad (8)$$

Asimismo, la matriz de Coriolis tiene la expresión:

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v}) \quad (9)$$

donde

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -m\mathbf{S}(\mathbf{v}_1) \\ -m\mathbf{S}(\mathbf{v}_1) & -\mathbf{S}(\mathbf{I}_c \mathbf{v}_2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

y  $v_1 = [u, v, w]^T$ ,  $v_2 = [p, q, r]^T$ , y el operador  $\mathbf{S}(\cdot)$  representa una matriz antisimétrica, y

$$\mathbf{C}_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

es la matriz de Coriolis debida a la masa agregada considerando que el vehículo se mueve a bajas velocidades y tiene tres ejes de simetría.

La matriz de amortiguamiento hidrodinámico puede expresarse de la siguiente manera:

$$\mathbf{D}(v) = \mathbf{D}_l + \mathbf{D}_n \quad (12)$$

donde  $\mathbf{D}_l$  representa el amortiguamiento lineal que se manifiesta a bajas velocidades y  $\mathbf{D}_n$  el amortiguamiento no lineal que es dominante a altas velocidades. Asumiendo que el movimiento del vehículo es desacoplado se obtiene la siguiente matriz diagonal:

$$\mathbf{D}(v) = -\text{diag}\{D_u, D_v, D_w, D_p, D_q, D_r\} \quad (13)$$

Los elementos de esta matriz tienen la siguiente forma:

$$\mathbf{D}_U = -kU - \frac{1}{2}\rho C_D(R_n)A|U|U \quad (14)$$

donde  $U = u, v, w, p, q, r$  es la velocidad con respecto a cada eje,  $A$  es el área de la sección transversal,  $\rho$  es la densidad del agua,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre,  $R_n$  es el número de Reynolds,  $k$  es una constante de proporcionalidad.

El vector  $\mathbf{g}(\eta)$  que incluye el efecto de fuerzas de gravedad y flotabilidad denominadas fuerza de restauración tiene la siguiente expresión

Las fuerzas de gravedad  $W_g = mg$  y de flotabilidad  $B = \rho g \nabla$ , también tienen un efecto en la dinámica de los vehículos marinos, donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\nabla$  es el volumen del fluido desplazado.

Estas fuerzas forman parte del vector  $\mathbf{g}(\eta)$  denominado vector de fuerzas de restauración:

$$\mathbf{g}(\eta) = - \begin{bmatrix} \mathbf{R}^{-1}(\phi, \theta, \psi)(f_g^n + f_b^n) \\ \mathbf{r}_b^b \times \mathbf{R}^{-1}(\phi, \theta, \psi)f_b^n \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde  $r_b^b = [x_b, y_b, z_b]^T$  es el centro de flotabilidad,  $f_g^n = [0, 0, W_g]^T$  y  $f_b^n = -[0, 0, B]^T$  son los vectores de fuerza de gravedad y de flotabilidad, respectivamente.

El vector  $\mathbf{w}$  representan las perturbaciones generadas por olas, corrientes y el viento presentes en el medio ambiente. Estos fenómenos se consideran indeseables ya que afectan de manera negativa el comportamiento dinámico de los vehículos submarinos. Existen modelos matemáticos (Perez (2005), K. Ochi (2005)) pueden utilizarse para describir el comportamiento de este tipo de perturbaciones.

La representación matemática del comportamiento del vehículo submarino representa una parte fundamental para el

diseño de algoritmos de control avanzado como parte de un sistema de control en lazo cerrado, o también para utilizarse con fines de simulación numérica para predecir el comportamiento del sistema real antes de realizar una implementación. En la siguiente sección se aborda el problema de describir la estructura básica de control para sistemas submarinos.

## 5. Sistema de Guiado, Navegación y Control

En esta sección se presenta al sistema de control de un vehículo submarino como aquel que está formado usualmente por tres bloques denotados como los sistemas de guía, navegación y control (*GNC*, por sus siglas en inglés) (Fossen (2002)). Estos sistemas interactúan con los demás a través de transmisión de datos y señales ilustradas en la Figura 4, donde se muestra un sistema de control automático para vehículos submarinos. El sistema GNC, considerando su forma más básica, esta conformado por un modelo de referencia (sistema de guiado), un sistema de sensores (sistema de navegación) y un sistema de control por retroalimentación. A continuación se define el significado de cada uno de los bloques.

**Guiado.** Es la acción o el sistema que continuamente calcula la posición, velocidad y aceleración de un vehículo, para ser usadas por el sistema de control. Estos datos son proporcionados usualmente al operador humano y al sistema de navegación. El sistema de guiado recibe como entradas lo que se conoce como puntos guía, y con esta información genera trayectorias para alcanzar una localización deseada. Las referencias en posición y de velocidad son enviadas al sistema control como el comportamiento deseado.

**Navegación.** Es la ciencia de dirigir un vehículo mediante la determinación de su posición, curso y distancia viajada. El sistema de navegación se encarga de proporcionar estimados de la posición, orientación y velocidad del vehículo mediante algoritmos de fusión de datos u observadores de estado.

**Control.** Es la acción de determinar las fuerzas y momentos de control necesarios generados por el vehículo para satisfacer un cierto objetivo de control. El bloque de control representa involucra un proceso de diseño y de sintonización de algoritmos de control que gobernarán los movimientos del vehículo. El cálculo de la señal de control depende de la información de las posiciones y velocidades proporcionadas por el sistema de navegación. En el diseño de controladores pueden utilizarse técnicas de control clásico, moderno, avanzado, etc.

## 6. Control de Seguimiento de Trayectorias para un AUV en el plano horizontal

En esta sección, se presenta el diseño de un controlador de seguimiento de trayectoria en el plano horizontal para un AUV desarrollada en el trabajo de Cervantes et al. (2016).

### 6.1. Planteamiento del problema

El problema consiste en que el AUV debe converger asintóticamente a posiciones deseadas partiendo desde un punto arbi-

trario bajo el efecto de perturbaciones externas, es decir:

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \|\eta(t) - \eta^d(t)\| \leq \beta, \quad \beta > 0 \quad (16)$$

donde  $\eta = [x, y]^T$  es el vector de posición del AUV en el plano horizontal y  $\eta^d$  corresponde al comportamiento deseado.

### 6.2. Modelo del AUV de 4 Grados de Libertad

Para realizar un seguimiento en el plano horizontal es necesario transformar el modelo (2a) al marco de referencia NED a través de (2b). Una vez realizado lo anterior, la dinámica del AUV (2) puede simplificarse considerando solo los movimientos en  $x, y, z$  y  $\psi$ , y las siguientes suposiciones:

- A1** . Velocidad relativa baja,
- A2** . Simetría del AUV alrededor de tres ejes,
- A3** . El AUV es estable horizontalmente, i.e., se desprecian los movimientos de alabeo y cabeceo ( $\phi, \theta \approx 0$ ).

Obteniéndose, el siguiente conjunto de ecuaciones que gobiernan la dinámica de un AUV con 4 grados de libertad ( $x, y, z, \psi$ ):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f_1(\psi(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t)) + g_{1,\psi}(\psi(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t))\dot{\psi}(t) + \\ &g_{1,x}(\psi(t))X(t) + g_{1,w_u}(\psi(t))\mathbf{w}_u(t) + g_{1,w_v}(\psi(t))\mathbf{w}_v(t) \\ \dot{y}(t) &= f_2(\psi(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t)) + g_{2,\psi}(\psi(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t))\dot{\psi}(t) + \\ &g_{2,x}(\psi(t))X(t) + g_{2,w_u}(\psi(t))\mathbf{w}_u(t) + g_{2,w_v}(\psi(t))\mathbf{w}_v(t) \\ \dot{z}(t) &= f_3(\dot{z}(t)) + g_{3,z}Z(t) + g_{3,w_w}\mathbf{w}_w(t) \\ \ddot{\psi}(t) &= f_4(\psi(t), \dot{\psi}(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{z}(t)) + \\ &g_{4,N}N(t) + g_{4,w_r}\mathbf{w}_r(t) \end{aligned} \quad (17)$$

Las funciones que describen la dinámica de  $x$  son:

$$\begin{aligned} f_1(\psi, \dot{x}, \dot{y}) &= \{c_1 \cos^2 \psi + c_2 \sin^2 \psi\}\dot{x} + \\ &\{c_1 \cos \psi \sin \psi - c_2 \sin \psi \cos \psi\}\dot{y} \\ g_{1,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) &= c_3\{\dot{x} \sin \psi \cos \psi - \dot{y} \cos^2 \psi\} + \\ &c_4\{\dot{x} \sin \psi \cos \psi + \dot{y} \sin^2 \psi\} - \dot{y} \\ g_{1,x}(\psi) &= g_{1,w_u}(\psi) = c_5 \cos \psi, \quad g_{2,w_v}(\psi) = -c_6 \sin \psi \end{aligned} \quad (18)$$

Las funciones correspondientes a la dinámica de  $y$  son:

$$\begin{aligned} f_2(\psi, \dot{x}, \dot{y}) &= \{c_1 \sin \psi \cos \psi - c_2 \cos \psi \sin \psi\}\dot{x} + \\ &\{c_1 \sin^2 \psi + c_2 \cos^2 \psi\}\dot{y} \\ g_{2,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) &= -c_3\{\dot{y} \sin \psi \cos \psi + \dot{x} \sin^2 \psi\} - \\ &c_4\{\dot{y} \sin \psi \cos \psi - \dot{x} \cos^2 \psi\} + \dot{x} \\ g_{2,x}(\psi) &= g_{2,w_u}(\psi) = c_5 \sin \psi, \quad g_{2,w_v}(\psi) = c_6 \cos \psi \end{aligned} \quad (19)$$

En la coordenada  $z$ , las funciones no lineales satisfacen:

$$f_3(\dot{z}) = c_7 \dot{z} + c_8, \quad g_{3,z} = g_{3,w_w} = c_9 \quad (20)$$

Las funciones asociadas a la dinámica de la posición angular  $\psi$  son:

$$\begin{aligned} f_4(\psi, \dot{\psi}, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) &= \{c_{10}[\dot{x} \sin \psi \cos \psi - \\ &\dot{y} \cos^2 \psi - \dot{z}] + c_{11}[\dot{x} \sin \psi \cos \psi + \dot{y} \sin^2 \psi]\}\dot{x} + \\ &\{-c_{10}[\dot{y} \sin \psi \cos \psi + \dot{x} \sin^2 \psi] - c_{11}[\dot{y} \sin \psi \cos \psi - \\ &\dot{x} \cos^2 \psi]\}\dot{y} + c_{12}\dot{\psi} \\ g_{4,N} &= g_{4,w_r} = c_{13} \end{aligned} \quad (21)$$

Los parámetros del sistema se describen a través de los siguientes términos:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{D_u}{m - X_{\dot{u}}}, c_2 = \frac{D_v}{m - Y_{\dot{v}}}, c_3 = \frac{Y_{\dot{v}} - m}{m - X_{\dot{u}}}, \\ c_4 &= \frac{m - X_{\dot{u}}}{m - Y_{\dot{v}}}, c_5 = \frac{1}{m - X_{\dot{u}}}, c_6 = \frac{1}{m - Y_{\dot{v}}}, \\ c_7 &= \frac{D_w}{m - Z_{\dot{w}}}, c_8 = \frac{F_{WB}}{m - Z_{\dot{w}}}, c_9 = \frac{1}{m - Z_{\dot{w}}}, \\ c_{10} &= \frac{m - Y_{\dot{v}}}{I_z - N_{\dot{r}}}, c_{11} = \frac{X_{\dot{u}} - m}{I_z - N_{\dot{r}}}, c_{12} = \frac{D_r}{I_z - N_{\dot{r}}}, \\ c_{13} &= \frac{1}{I_z - N_{\dot{r}}} \end{aligned} \quad (22)$$

donde  $m$  es la masa del vehículo,  $F_{WB} = W_g - B$  es el peso aparente,  $D_u, D_v, D_w$  y  $D_r$  son elementos de la matriz de amortiguamiento hidrodinámico,  $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}$  y  $N_{\dot{r}}$  son los elementos asociados a la masa agregada y  $I_z$  es el tensor de inercia respecto al eje  $Z_B$  y  $\mathbf{w}_u, \mathbf{w}_v, \mathbf{w}_w$  y  $\mathbf{w}_r$  son las perturbaciones externas.

### 6.3. Leyes de Control Linealizante y Backstepping

En esta sección se emplea la estrategia de control presentada basada en una combinación de las técnicas de linealización exacta y Backstepping. Para el diseño de este controlador se parte del sistema nominal libre del efecto de perturbaciones y se aplica posteriormente al sistema perturbado.

El primer paso es expresar las dinámicas de  $x$  e  $y$  en la siguiente forma

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\psi, \dot{x}, \dot{y}) \\ f_2(\psi, \dot{x}, \dot{y}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{1,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) & g_{1,x}(\psi) \\ g_{2,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) & g_{2,x}(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ X \end{bmatrix} \quad (23)$$

Se proponen los cambios de variable  $e_x = x - x^d$  y  $e_y = y - y^d$ , para el seguimiento en  $x, y$  y  $z$ , respectivamente, cuyas dinámicas están gobernadas por las siguientes ecuaciones

$$\begin{bmatrix} \ddot{e}_x \\ \ddot{e}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\psi, \dot{x}, \dot{y}) \\ f_2(\psi, \dot{x}, \dot{y}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{1,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) & g_{1,x}(\psi) \\ g_{2,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) & g_{2,x}(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ X \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \ddot{x}^d \\ \ddot{y}^d \end{bmatrix} \quad (24)$$

En este caso se considera la velocidad  $\dot{\psi}$  como un control virtual  $v_1$  y el vector de entrada queda definido como  $V = [v_1, X]^T$ . Este vector de entrada se diseña mediante la técnica de linealización exacta para estabilizar el comportamiento de (24), con la forma

$$V = G^{-1} \left( \begin{bmatrix} \ddot{x}^d - f_1(\psi, \dot{x}, \dot{y}) \\ \ddot{y}^d - f_2(\psi, \dot{x}, \dot{y}) \end{bmatrix} - K_{p,xy} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} - K_{d,xy} \begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} \right) \quad (25)$$

donde la matriz  $G$  esta dada por

$$G := \begin{bmatrix} g_{1,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) & g_{1,x}(\psi) \\ g_{2,\psi}(\psi, \dot{x}, \dot{y}) & g_{2,x}(\psi) \end{bmatrix},$$

y  $K_{p,xy}, K_{d,xy} \in \mathbb{R}^+$ .

Nota: La matriz  $G$  no es invertible solo cuando  $x = y = 0$  simultáneamente, lo cual no ocurre durante el seguimiento de la trayectoria.

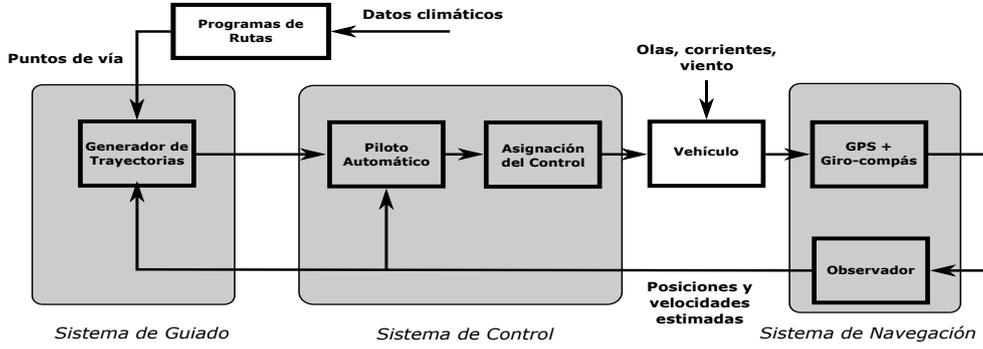


Figura 4: Sistema de Guiado, Navegación y Control. Original en Fossen (2002)

El segundo y tercer sumando de (25) representan un control por retrolimentación de estado, diseñado para que los sistemas en lazo cerrado (24)-(25) sean asintóticamente estables, i.e.,  $e_x(t), e_y(t) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ .

Seguido el método de Backstepping, se define el siguiente cambio de variable  $e_{v_1} = \dot{\psi} - v_1$  para hacer que  $\dot{\psi}$  se comporte como  $v_1$  con la siguiente dinámica

$$\dot{e}_{v_1} = f_4(\psi, \dot{\psi}, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) + g_{4,N}N - \dot{v}_1 \quad (26)$$

La entrada de control que estabiliza  $e_{v_1}$  se propone como

$$N = g_{4,N}^{-1}(\dot{v}_1 - f_4(\psi, \dot{\psi}, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) - K_{v_1}e_{v_1}) \quad (27)$$

donde  $K_{v_1}, g_{4,N} \in \mathbb{R}^+$ . Entonces, el sistema en lazo cerrado (26) - (27) es asintóticamente estable, i.e.,  $e_{v_1}(t) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ . Por su parte, la dinámica de  $z$  en (17) es parcialmente desacoplada y puede controlarse de manera separada. La dinámica del error  $e_z = z - z^d$  se describe por

$$\ddot{e}_z = f_3(\dot{z}) + g_{3,Z}Z - \ddot{z}^d \quad (28)$$

Entonces, la entrada de control  $Z$  se propone como la linealización exacta

$$Z = g_{3,Z}^{-1}(\ddot{z}^d - f_3(\dot{z}) - K_{p,z}e_z - K_{d,z}\dot{e}_z) \quad (29)$$

donde  $K_{p,z}, K_{d,z} \in \mathbb{R}^+$ . El sistema en lazo cerrado (28)-(29) es asintóticamente estable, i.e.,  $e_z(t) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ .

#### 6.4. Resultados Numéricos

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en MATLAB Simulink basadas en los resultados obtenidos en Cervantes et al. (2016).

En este caso, la ley de control diseñada en la sección 6.2 basada en el modelo dinámico del vehículo submarino libre del efecto de perturbaciones externas, se aplica al sistema perturbado. Los parámetros usados para la simulación fueron  $m = 4,28 \text{ kg}$ ,  $X_{\dot{u}} = 0,5 \text{ kg/s}$ ,  $Y_{\dot{v}} = 0,22 \text{ kg/s}$ ,  $Z_{\dot{w}} = 0,3 \text{ kg/s}$ ,  $N_{\dot{r}} = 0,4 \text{ kgm}^2/\text{s}$ ,  $D_x, D_y, D_z, D_{\dot{\psi}} = 0,3$ ,  $I_z = 0,04$ ,  $F_{WB} = -0,5$ , y  $\mathbf{w}_u = \mathbf{w}_v = \mathbf{w}_w = \mathbf{w}_r = 0,001 \sin(0,1t)$ . La trayectoria deseada se consideró como una circular, i.e.,  $x^d = 50 \sin(0,1t)$ ,  $y^d = 50 \cos(0,1t)$ . La profundidad deseada fue  $z^d = 2,5$ . Las condiciones iniciales fueron:  $x(0) = 1,5$ ,  $y(0) = 1,2$ ,  $z(0) = 0$ ,

$\psi(0) = \pi/2$ ,  $\dot{x}(0) = 2$ ,  $\dot{y}(0) = 3$ ,  $\dot{z}(0) = 4$ ,  $\dot{\psi}(0) = 0,5$ . Las ganancias de los controladores usadas fueron:  $K_{p,xy} = 15$ ,  $K_{d,xy} = 16$ ,  $K_{v_1} = 1550$ ,  $K_{p,z} = 20$ ,  $K_{d,z} = 16$ . Las velocidades  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  y  $\dot{z}$  fueron aproximadas con un algoritmo de Super-Twisting (Levant (1998)). En la Figura 5, se ilustra el seguimiento de la

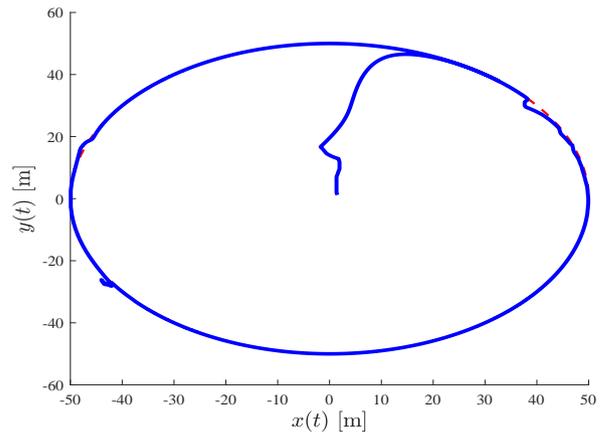


Figura 5: Seguimiento circular. Referencia (línea punteada) y trayectoria actual (línea sólida).

trayectoria circular del AUV en el plano X-Y. En la Figura 6 se observa el seguimiento de las trayectorias deseadas en cada uno de los ejes. En la Figura 7 se puede constatar que el sistema en lazo cerrado es robusto ante el efecto de las perturbaciones externas, puesto que los errores de seguimiento de trayectoria en los ejes X e Y permanecen dentro de una región alrededor del origen, después de un periodo transitorio (aproximadamente 10 segundos). Esta figura muestra que el error máximo que se presenta es de poco menos de 4 metros, el cual se encuentra dentro de una región aceptable, considerando que la trayectoria deseada es un círculo de 50 metros de diámetro. El error de posición en  $z$  alcanza cero en 2 segundos aproximadamente. Por otro lado, en la Figura 8 se muestran las señales de control virtual  $V_1$ , el momento alrededor del eje Z, el empuje en el eje X, y el empuje en el eje Z, que resuelven el problema de seguimiento, como consecuencia de aplicar las técnicas de Backstepping y de control Linealizante.

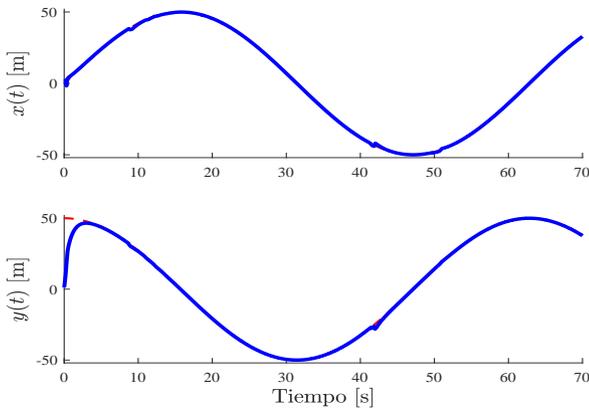


Figura 6: Seguimiento en los ejes  $x$  y  $y$ . Referencia (línea punteada) y trayectoria actual (línea sólida).

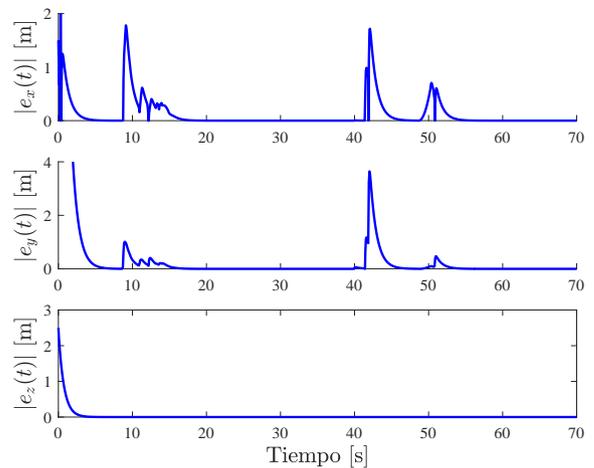


Figura 7: Magnitud de los errores de seguimiento para los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

### 7. Conclusiones

Los vehículos submarinos actualmente son una solución tecnológica que implementa sensores diversos, fuentes de alimentación propia, y la capacidad de tomar decisiones sin la intervención de un operador. Estos vehículos tienen una gran variedad de aplicaciones que impactan en la vida del ser humano debido a que resuelven problemáticas presentadas en campos tan diversos como el militar, comercial, recreativo y de investigación, etc. Los continuos desarrollos que se han realizado para mejorar el funcionamiento de los AUVs han hecho posible que puedan resolverse tareas cada vez más complejas. Algunas de ellas involucrando riesgos para la vida del ser humano o que requieren de una precisión que solo sistemas robóticos podrían realizar. En cuanto a los avances en el área del control automático, se han diseñado leyes de control que pueden lidiar con el funcionamiento de los AUVs en ambientes que inducen perturbaciones externas. En estos casos, se diseñan controladores basados en técnicas de control avanzadas, tales como técnicas robustas o adaptables para hacer que el sistema perturbado se comporte de manera adecuada durante las tareas autónomas que realice.

Existen también técnicas que consideran que los AUVs pueden modelarse a través de estructuras aproximadoras que permitan capturar las principales mecanismos dinámicos que forman parte del comportamiento de estos. Estas estructuras son la base del diseño de controladores menos complejos que puedan cumplir con los mismos objetivos de control. Uno de los principales objetivos de control es el llamado seguimiento de trayectorias, el cual tiene una gran cantidad de aplicaciones para realizar tareas autónomas como vigilancia perimetral, exploración de áreas, evasión de obstáculos, etc. Este trabajo presenta la ley de control desarrollado en Cervantes et al. (2016), que resuelve el problema de seguimiento de trayectorias a través de la combinación de las técnicas de linealización exacta y Backstepping. Este controlador obtenido es de característica no lineal, que una vez aplicado permite estabilizar los errores de posición del sistema a pesar del efecto de perturbaciones externas pu-

diendo seguir una trayectoria circular deseada.

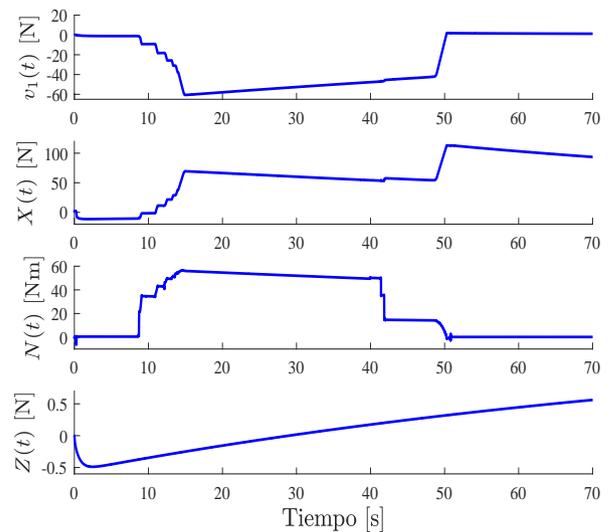


Figura 8: Señales de Control: Control virtual  $v_1$ , Empuje  $X$ , Momento  $N$ , Empuje  $Z$ .

### English Summary

#### Autonomous Underwater Vehicles.

#### Abstract

More than two thirds of the Earth’s surface is covered by water. The oceans and seas host a great amount of species of animals and plants making up ecosystems with a great biodiversity. Moreover, they represent a great of renewable and non-renewable energy sources for the benefit of the humankind. The underwater robotics represent a solution to solve diverse tasks

in underwater environments without the intervention of a human operator. During the last decades, the autonomous underwater vehicles have had a remarkable development and they have been gradually involved in various areas like the scientific, commercial and military ones, facing progressively more challenging operating scenarios. Thanks to the impressive advances developed nowadays in the computational, battery technology, miniaturization electronic systems and navigation sensors fields, the autonomous underwater vehicles have become technological devices with greater capabilities to accomplish autonomous tasks. This make it possible to state new approaches in order to give autonomy (or intelligence) to these vehicles by using processing systems and decision-making algorithms on board, namely controllers. The design of controllers obey to the application of mathematical techniques and theories to fulfill prescribed operational features for the underwater vehicles when they perform an autonomous task.

#### Keywords:

AUV, autonomy, submarine, modeling, control, tracking.

#### Referencias

- Aguiar, A.P., Pascoal, A.M., 2007. Dynamic positioning and way-point tracking of underactuated auvs in the presence of ocean currents. *International Journal of Control* 80, 1092–1108.
- von Alt, C., 2003. Autonomous underwater vehicles. *Autonomous underwater Langrangian platforms and sensors workshop*.
- Ballard, R., 1987. *The Discovery of the Titanic*.
- Bian, X., Qu, Y., Yan, Z., Zhang, W., 2010. Nonlinear feedback control for trajectory tracking of an unmanned underwater vehicle. *IEEE International Conference on Information and Automation*, 1387–1392.
- Blidberg, D., 2001. The development of autonomous underwater vehicles (auv): a brief summary. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Cervantes, J., Yu, W., Salazar, S., Chairez, I., Lozano, R., 2016. Output based backstepping control for trajectory tracking of an autonomous underwater vehicle, in: *2016 American Control Conference (ACC)*, pp. 6423–6428.
- Chen, Y., Li, J., Wang, K., Ning, S., 2017. Robust trajectory tracking control of underactuated underwater vehicle subject to uncertainties. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)* 25, 283–298.
- Curtin, T., Bellingham, J., 2001. Autonomous ocean-sampling networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26, 421–423.
- Egeland, O., Dalsmo, M., 1996. Feedback control of a nonholonomic underwater vehicle with constant desired configuration. *International Journal of Robotics Research* 15, 24–35.
- Elmokadem, T., Zribi, M., Youcef-Toumi, K., 2015. Trajectory tracking sliding mode control of underactuated AUVs. volume 84.
- Eski, I., Yildirim, S., 2014. Design of neural network control system for controlling trajectory of autonomous underwater vehicles. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 11, 1–17.
- Fossen, T.I., 2002. *Marine Control Systems*. *Marine Cybernetics*.
- Gan, W.Y., Zhu, D.Q., Xu, W.L., Sun, B., 2017. Survey of trajectory tracking control of autonomous underwater vehicles. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)* 25, 722–731. Cited By 0.
- Griffiths, G., Edwards, I., 2003. *Auvs: designing and operating next generation vehicles*. Elsevier Oceanography Series 69, 229–236.
- He-ming, J., Wen-long, S., Zi-yin, C., 2012. Nonlinear backstepping control of underactuated auv in diving plane. *Advances in information Sciences and Service Sciences* 4, 214–221.
- Husa, K.E., Fossen, T.I., 1997. Backstepping designs for nonlinear way-point tracking of ships. *Proceedings of the 4th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*.
- Jiang, Y., Guo, C., Yu, H., 2018. Horizontal trajectory tracking control for an underactuated auv adopted global integral sliding mode control, in: *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pp. 5786–5791. doi:10.1109/CCDC.2018.8408142.
- Joe, H., Kim, M., cheol Yu, S., 2014. Second-order sliding-mode controller for autonomous underwater vehicle in the presence of unknown disturbances. *Nonlinear Dynamics* 78, 183–196.
- K. Ochi, M., 2005. *Ocean waves: The stochastic approach* 6. doi:10.1017/CBO9780511529559.
- Kelly, R., Santibanez, V., 2003. *Control de movimiento de robots manipuladores*.
- Kinsey, J.C., Whitcomb, L.L., 2007. Model-based nonlinear observers for underwater vehicle navigation: Theory and preliminary experiments. *IEEE International Conference of Robotics and Automation*.
- Kondoa, H., Ura, T., 2004. Navigation of an auv for investigation of underwater structures. *Control Engineering Practice* 12, 1551–1559.
- Kumar, B., Subudhi, S.B., 2014. Adaptive tracking control of an autonomous underwater vehicle. *International Journal of Automation and Computing* 11, 299–307.
- Lakhekar, G., Waghmare, L., 2015. Dynamic fuzzy sliding mode control of underwater vehicles. *Advances and Applications in Sliding Mode Control systems, Studies in Computational Intelligence* 576, 279–304.
- Levant, A., 1998. Robust exact differentiation via sliding mode technique. *Automatica* 34, 379–384.
- Liu, X., Zhang, M., Chen, Z., 2019. Trajectory tracking control based on a virtual closed-loop system for autonomous underwater vehicles. *International Journal of Control*.
- Lygouras, J., Lalakos, K., Tsalides, P., 1998. Thetis: an underwater remotely operated vehicle for water pollution measurements. *Microprocessors and Microsystems* 22, 227–237.
- Nakamura, Y., Savant, S., 1992. Nonlinear tracking control of autonomous underwater vehicle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, A4–A9.
- Perez, T., 2005. *Ship Motion Control*. Springer-Verlag London.
- Raimondi, F., Melluso, M., 2010. Hierarchical fuzzy/lyapunov control for horizontal plane trajectory tracking of underactuated auv. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1875–1882.
- Refsnes, J.E., Sorensen, A.J., Pettersen, K.Y., 2008. Model-based output feedback control of slender-body underactuated auvs: Theory and experiments. *IEEE Transaction on Control System Technology* 16, 930–946.
- Rezazadegan, F., Shojaei, K., 2013. An adaptive control scheme for 6-dof control of an auv using saturation functions. *3rd International Conference on Intelligent Computational Systems*, 67–72.
- Rife, J., Rock, S., 2002. Field experiments in the control of a jellyfish tracking rov. *MTS/IEEE Oceans* 4, 2031–2038.
- Smallwood, D., Bachmayer, R., Whitecomd, L., 1999. A new remotely operated underwater vehicle for dynamics and control research. *Proceedings UUST*.
- 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, pp. 1–15.
- Song, Y., Ali, A., Arshad, M., 2018. Robust tracking control for underactuated autonomous underwater vehicle in horizontal plane.
- Spong, M.W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., 2005. *Robot Modeling and Control*. Wiley.
- Tivey, M., Johnson, H.; Bradley, A., Yoerger, D., 1998. Thickness of a submarine lava flow determined from near-bottom magnetic field mapping by autonomous underwater vehicle. *Geophysical Research Letters* 25, 805–808.
- Wang, X., Wang, J., 2014. Neurodynamics-based model predictive control for trajectory tracking of autonomous underwater vehicles. *Advances in Neural Networks* 8866, 184–191.
- Wernli, R., 2001. Low cost auvs for military applications: Is the technology ready in pacific.
- Willcox, S., Vaganay, J., Grieve, R., Rish, J., 2001. The bluefin bpauv: An organic widearea bottom mapping and mine-hunting vehicle. *Proceedings UUST*.
- Williams, C., 2004. Auv systems research at the nrc-iot: an update. *International Symposium on Underwater Technology*, 59–73.
- Wilson, R., Bales, J., 2006. Development and experience of a practical pressure-tolerant, lithium battery for underwater use, .. *Oceans*, 1–5.