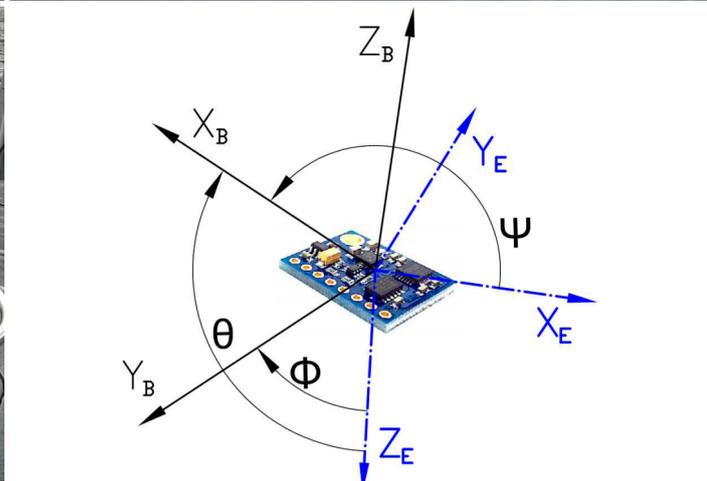
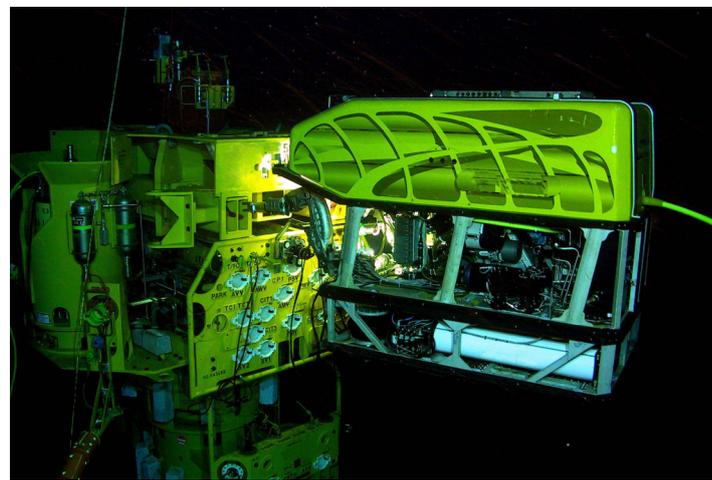


Vehículo submarino autónomo

Un enfoque práctico



Alejandro Héctor Molina
Mabel Noemí Bottoni.
Horacio Mario Simonetti.
Ernesto Castagnet.
Germán Fernández Madarieta.
Claudio Cesar Lopez.





Vehículo submarino autónomo

Un enfoque práctico

Dr. Molina, Alejandro Héctor.
Ing. Bottoni, Mabel Noemí.
Mg. Ing Simonetti, Horacio Mario.
Mg. Ing. Castagnet, Ernesto.
Esp. Lic. Fernández Madarieta, Germán.
Mg. Lic. Lopez, Claudio Cesar.

Vehículo submarino autónomo: un enfoque práctico / Alejandro Héctor Molina ... [et al.]; coordinación general de Alejandro Héctor Molina; editado por Fernando Cejas. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-8992-18-1

1. Submarino. 2. Modelado. I. Molina, Alejandro Héctor, coord. II. Cejas, Fernando, ed.

CDD 359.93

Diseño de Tapa e interior: Fernando Cejas



Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina

Rector: Ing. Rubén Soro

Vicerrector: Ing. Haroldo Avetta

Secretaría Cultura y Extensión Universitaria: Ing. Federico Olivo Aneiros



Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Bahía Blanca

Decano: Ing. Alejandro Staffa.

Vicedecano: Mg. Ing. Carlos Vera.



edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional

Coordinador General a cargo: Fernando Cejas

Dirección General: Mg. Claudio Véliz

Dirección de Cultura y Comunicación: Ing. Pablo Lassave

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© edUTecNe, 2023

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ)

Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina



ISBN 978-987-8992-18-1



Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

Coordinador y autor

Dr. Molina, Alejandro Héctor.

Director del Grupo de Desarrollo de Herramientas Computacionales
UTN FRBB.
ale_molina@frbb.utn.edu.ar

Autores

Ing. Bottoni, Mabel Noemí.

Investigadora del Grupo de Desarrollo de Herramientas Computacionales
UTN FRBB.
ing_mabel_bottoni@hotmail.com

Mg. Ing Simonetti, Horacio Mario.

Investigador del Grupo de Desarrollo de Herramientas Computacionales
UTN FRBB.
piddef0912@gmail.com

Mg. Ing. Castagnet, Ernesto.

Investigador del Grupo de Desarrollo de Herramientas Computacionales
UTN FRBB.
ecastagnet@frbb.utn.edu.ar

Esp. Lic. Fernández Madarieta, Germán.

Investigador del Grupo de Desarrollo de Herramientas Computacionales
UTN FRBB.
gfernandes@frbb.utn.edu.ar

Mg. Lic. López, Claudio Cesar.

Investigador del Grupo de Desarrollo de Herramientas Computacionales
UTN FRBB.
claudiolopez@fie.undef.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Alejandro Héctor Molina

VEHÍCULOS SUBMARINOS AUTÓNOMOS

Mabel Bottoni, Alejandro Molina, Ernesto Castagnet

MODELADO DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO

Mabel Bottoni, Alejandro Molina, Germán Fernández Madarieta

SIMULACIÓN CON MATLAB Y SIMULINK DE UN MODELO DE UAV

Mabel Bottoni, Alejandro Molina, Germán Fernández Madarieta

SISTEMAS DE CONTROL PARA USO EN CUADCÓPTEROS Y AUVs

Alejandro Molina, Germán Fernández Madarieta, Horacio Simonetti

CONTROL DE LA NAVEGACIÓN DE UN UAV UTILIZANDO UNA ARQUITECTURA BASADA EN UNA RED NEURONAL

Alejandro Molina, Horacio Simonetti.

CONTROL DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA SUBACUA EMPLEANDO REDES NEURONALES

Claudio Cesar López

Introducción

Alejandro Molina

El presente libro es una compilación de trabajos realizados en el transcurso de las tareas de investigación llevadas a cabo por el Grupo de investigación sobre "Desarrollo de Herramientas Computacionales para Ingeniería, Organización y Enseñanza" (GDHC) de la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional, dentro del Proyecto de Investigación de la Universidad de la Defensa Nacional (UNDEF): "Desarrollo de un modelo de control autónomo para una plataforma sumergible operada remotamente empleando técnicas de inteligencia artificial" Expediente UNDEF N° 484/2019.

Durante el transcurso de las tareas de investigación se debió reformular la plataforma a ser utilizada, profundizando la modelización dinámica de un vehículo autónomo submarino (UAV, por la sigla en inglés de Underwater Autonomous Vehicle), a los efectos de llegar a una mejor comprensión de la respuesta del UAV en condiciones de operación. Las tareas se continuaron con la simulación de una plataforma propuesta donde dicho comportamiento pudo ser estudiado aplicando Matlab y Simulink, aplicaciones que permiten ver las características de su funcionamiento a partir de un modelado más sencillo que la aplicación de las ecuaciones del UAV.

Teniendo definida la respuesta de vehículo a ser controlado se planteó el problema de hallar un método de control adecuado, por ello se realizó una revisión de los métodos de control que podían aplicarse mediante una revisión bibliográfica y también se formuló una metodología de selección, en función de los diversos esquemas de control existentes, las configuraciones de control que optimicen los problemas navegación que se presenta para distintos contextos geográficos y operativos. La revisión realizada y el método de evaluación de los distintos sistemas de control para un determinado uso, permitió disponer de una herramienta de análisis y de selección, para el control de UAV bajo determinadas condiciones de operación.

Para concluir, se realizó un diseño de la implementación del sistema de control y de un sistema de navegación que completaron las tareas incluidas en el PID.

Este libro presenta algunos de los trabajos representativos de las tareas que se realizaron y que comienzan con una revisión histórica y técnica de estos vehículos bajo el título de "Vehículos Submarinos Autónomos" con la autoría

de: Mabel Bottoni, Alejandro Molina y Ernesto Castagnet. En este trabajo se fundamenta la relevancia de estos vehículos y sus posibilidades futuras; se realiza una revisión de los antecedentes y una histórica de los mismos; se propone una clasificación de los mismos como: Vehículos Submarinos Operados Remotamente, Vehículos Submarinos Autónomos y Vehículos Submarinos Autónomos para Intervenciones; también se analiza los componentes de los UAV, como lo son: La estructura y el diseño, los sensores y la instrumentación, los sensores para orientación y comunicaciones, los sistemas de visión, los sistemas de propulsión y las fuentes de energía. Se describe la evolución del manejo de los Vehículos Autónomos Submarinos; la innovación en la tecnología de los AUV en particular los vehículos submarinos autónomos de clase ligera. El trabajo finaliza realizando una perspectiva del futuro de los AUV.

El trabajo siguiente es el "Modelado de un Vehículo Autónomo Subacuático" realizado por Mabel Bottoni, Alejandro Molina y Germán Fernández Madarieta, presenta un análisis matemático basado en el comportamiento estático y dinámico del vehículo autónomo subacuático, lo que va a permitir simular y evaluar el comportamiento de estos vehículos marinos dentro del agua, de modo de poder disponer un modelo de comportamiento mecánico del vehículo a ser operado. Se considera al móvil en estudio como un sólido rígido, suposición que permite desestimar las fuerzas que actúan de manera específica entre los elementos de masa del vehículo, para realizar el análisis dinámico del mismo. Posteriormente se analiza de modo particular el vehículo propuesto obteniendo la matriz de inercia, la masa añadida, la matriz de Coriolis, el amortiguamiento hidrodinámico, los términos hidrostáticos y finalmente, las fuerzas de propulsión.

A continuación, el trabajo "Simulación con Matlab y Simulink de un modelo de UAV" realizado por Mabel Bottoni, Alejandro Molina y Germán Fernández Madarieta; propone la simulación mediante el uso de Matlab Y Simulink, ya que permiten ver las características del funcionamiento del UAV, a partir de un modelado más sencillo que la aplicación de las ecuaciones obtenidas en el trabajo anterior. Se utilizó el AEROSPACE BLOCKSET de Simulink, una herramienta que permite resolver las ecuaciones de movimiento sin realizar cálculos complejos, como el 6-DOF BLOCK, que integra las fuerzas y momentos en todas las direcciones; también se utilizaron los ROTATION BLOCKS, los COORDINATE TRANSFORMATION BLOCKS y el IMU SENSOR MODEL para introducir perturbaciones en las variables utilizadas como ocurriría en la realidad. A partir de ellos se construyó un modelo con cuatro subsistemas con el que pudo simularse distintas condiciones de operación que se detallan en el trabajo.

En el siguiente trabajo, "Sistemas de control para uso en cuadcópteros y AUV" los autores Alejandro Molina, Germán Fernández Madarieta y Horacio Simonetti, analizaron los diversos esquemas de control existentes y realizaron una búsqueda de configuraciones de control que optimicen los problemas navegación que se presentan para distintos contextos geográficos y operativos. Se incluyó el modelo matemático del sistema controlado y se revisaron los sistemas de control aplicables, mediante una revisión bibliográfica. Se propuso un método sistemático de selección del sistema de control, a pesar de que ningún método posee todas las características frente al total de los problemas que se debe enfrentar en el diseño de un sistema de control. Se verificó que se obtiene un mejor rendimiento al combinar distintos algoritmos que aporten la mejor combinación de las características deseadas, tales como: robustez, adaptabilidad, optimalidad, simplicidad, capacidad de rastreo, respuesta rápida y rechazo de perturbaciones, entre otros. También, que el método de evaluación a priori propuesto ayuda en la selección de una combinación de los sistemas de control a utilizarse.

En los trabajos siguientes: "Control de la Navegación de un UAV utilizando una Arquitectura Basada en una Red Neuronal" realizado por Alejandro Molina y Horacio Simonetti; y "Control de Navegación Autónoma Subacua empleando Redes Neuronales" realizado por Claudio Cesar López, se presentan dos implementaciones: la primera un sistema de control y la segunda un programa de control de navegación. La finalidad de estos trabajos es mostrar cómo se implementan y se aplican al vehículo propuesto.

Estos trabajos describen tareas dentro de la investigación que antes señalamos y que se comparten en este libro con la intención de ayudar a quienes deban realizar tareas similares o para que se pueda dimensionar la realización de proyectos similares.

Vehículos submarinos autónomos

Mabel Bottoni
Alejandro Molina
Ernesto Castagnet

1. Introducción

En los campos de la astronáutica y de la exploración de los fondos submarinos, el empleo de sistemas autónomos ha provocado una revolución en varias áreas de la actividad humana. Estos sistemas permiten llegar a lugares que el ser humano físicamente no podría acceder y realizar actividades que ciertamente estarían limitados a hacer en determinados entornos peligrosos. Esto sumado al grado de autonomía que se les ha otorgado, en base al gran adelanto tecnológico logrado en los últimos años, posibilita disminuir la carga de su manipulación a los operadores.

Los vehículos submarinos no tripulados en el pasado han sido máquinas utilizadas para investigación y tareas específicas pre-programadas, las dificultades de construir y operar estos sumergibles en la práctica, los hicieron menos populares que sus parientes aéreos y terrestres. Sin embargo, con la tecnología en constante avance, los vehículos autónomos submarinos, AUV (Autonomous Underwater Vehicles), en la actualidad se han expandido, logrando una gran capacidad para completar una variedad más amplia de misiones que sus predecesores específicos de investigación.

Los AUV se enfrentan a un desafío único, que otros vehículos no tripulados no enfrentan, el océano. Este es un entorno agresivo y variado, en el que a menudo puede haber altas presiones, animales marinos tan pequeños como los microorganismos y tan grandes como las ballenas, que pueden interferir con la operación. En donde las comunicaciones son prácticamente inexistentes, y la robustez de estas embarcaciones submarinas, sin excepción, significa que deben ser impermeables, herméticas o ambas. Como resultado, deben ser en gran parte autónomos, capaces de soportar los rigores del entorno marino y estar entre los vehículos diseñados con mayor eficiencia energética.

Históricamente, se han desarrollado muchos vehículos sumergibles para realizar tareas en el mar, los primeros fueron los vehículos remotamente

operados (Remote Operated Vehicles – ROV's), que aún son utilizados con éxito, pero tienen restricciones para la realización de operaciones específicas o de mayor cobertura. El desarrollo de los AUV, presentó, como ventaja, la mayor capacidad de navegación con respecto a los ROV, ya que los sistemas de planeamiento de rutas y control que poseen permiten aumentar las características de navegación de forma autónoma.

Los primeros desarrollos de estos equipos datan de 1960, cuando su investigación fue impulsada por la Marina de los EE. UU (Wernli, 2001), para ser utilizados en tareas de rescate y operaciones en mar profundo. Más tarde universidades, institutos y organizaciones gubernamentales comenzaron el desarrollo y experimentación de la tecnología AUV. Desde entonces, hubo un gran avance en esta tecnología y muchos sectores industriales y comerciales al notar el potencial de tales dispositivos para el desarrollo de muy diversas tareas específicas en sus ámbitos de interés, han invertido ampliamente para su implementación y diversificación. Una de estas aéreas fue la industria del petróleo, la cual utiliza los AUV en el desarrollo de yacimientos petrolíferos en alta mar (Williams, 2004). Actualmente estos vehículos son utilizados de forma constante en los sistemas *offshore* como equipos de apoyo e inspección.

Pero no fue hasta la década de 1980, cuando los AUV entraron en una nueva era ya que el avance de la tecnología les permitió operar a profundidades mayores, lo cual les permitió competir con las operaciones comerciales llevadas adelante por buzos. A comienzos de la primer década del año 2000, aparecieron los primeros AUV comerciales, y a partir de allí su amplia utilización en muy distintas aplicaciones, tales como la localización de naufragios, la cartografía del fondo marino (Tivey et al., 1998), la inspección autónoma del casco de un buque, la exploración y explotación de petróleo y gas, la detección de objetos sumergidos (Kondoa&Ura, 2004), la búsqueda y localización de cardúmenes y mariscos (Willcox et al.,2004), además de sus múltiples aplicaciones científicas. Para las operaciones militares se han desarrollado equipos AUV, especialmente diseñados para misiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento submarinos de larga duración.

En los últimos años los avances en el diseño y la fabricación de baterías, el desarrollo de materiales de alta resistencia y gran durabilidad, han dado lugar a un aumento significativo en las aplicaciones de los AUV. El desarrollo de nuevas tecnologías de localización y comunicación les permitieron, por ejemplo, capacidades de GPS en la superficie, navegación avanzada debajo de la superficie, comunicaciones acústicas, registros de velocidad Doppler, para la navegación, así como una sofisticada infraestructura de software que respaldan altamente sus las funciones de autonomía.

2. Antecedentes de los AUVs.

Las primeras experiencias en el desarrollo de vehículos subacuáticos fueron llevadas a cabo en el "Laboratorio Aplicado de Física" de la Universidad de Washington en 1957 por parte de los investigadores Stan Murphy, Bob Francois y Terry Ewart. "El Vehículo Subacuático de Investigación de Propósitos Especiales", o SPURV, que fue utilizado para estudiar la difusión y transmisión acústica bajo la superficie. Posteriormente, en los años setenta, otro sumergible no tripulado fue desarrollado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, con el propósito de detectar las estelas dejadas por los submarinos soviéticos. La exploración submarina evolucionó rápidamente a comienzos de los años 80, con la utilización del primer vehículo sumergible operado remotamente por la empresa *i-Tech* en una plataforma de perforación de Noruega. Sin embargo, su gran evolución se produjo a comienzos de los años 90 cuando se desarrolló el primer vehículo autónomo sumergible (AUV), el cual tenía elementos para navegación autónoma. Este primer AUV fue denominado "*HUGIN*", desarrollado por una asociación internacional compuesta por *Kongsberg Maritime*, Departamento de Investigaciones de Defensa de Noruega, *Statoil*, *Nui As*, *C&C Technologies*, *Geoconsult AS*, *BP* y *Norsk Hydro*, utilizando sistemas como el (*Differential Global Positioning System – DGPS* y *Ultra Short Base Line - USBL*) presentados en (M. Mandt, K. Gade, B. Jalving, 2001) y (*NAVLAB*) presentado en (K. GADE, "NavLab, 2004). Su principal uso en aplicaciones civiles fue la investigación y control ambiental y en aplicaciones militares la detección y conteo de minas en el mar.

Estos primeros vehículos tenían la capacidad de transportar diferentes tipos de sensores, sin embargo, su envergadura era grande, comparados con los desarrollados en la actualidad, lo cual hacía que se necesitara de grandes medios de transporte para su traslado. Se han concebido desde entonces una gran variedad de AUVs, cada uno ofreciendo diferentes ventajas según las aéreas de destino, como por ejemplo los vehículos portables que pesen menos de veinte kilos, vehículos livianos de 250 kilos, vehículos pesados de 1,5 toneladas y grandes vehículos de mayores de 10 toneladas.

En el año 2000, la marina de Estados Unidos, lanzó una versión modernizada de su Plan de vehículos no tripulados submarinos. Este nuevo plan ofrece detalladamente la concepción de nueve capacidades que los analistas han asociado con los AUVs: Inteligencia, reconocimiento, anti-minado, guerra antisubmarina, inspección e identificación, oceanografía, establecimiento de redes de comunicaciones y navegación, transporte de carga útil, operaciones de información y golpes comando en tiempos críticos. Desde entonces estos

dispositivos han tenido participación, por ejemplo, durante la operación "IRAQI FREEDOM", en el año 2003, trabajando en cooperación con otros dispositivos de la fuerza de coalición para la limpieza de minas en las proximidades del puerto iraquí de UM QASR. Otros países como Canadá, Suecia, Gran Bretaña, Alemania tienen sus propios desarrollos con distinto grado de complejidad, orientados fundamentalmente a la guerra de minas.

Estos equipos han sido objeto de estudio de varios grupos de investigación y desarrollo, entre ellos la Universidad de Alberta, que dirige el proyecto "Autonomous Robotic Vehicle Project", dedicado al estudio general de vehículos autónomos y en particular a los dispositivos sumergibles. Existen varios proyectos que demuestran la diversidad de modelos de AUVs diseñados para tareas específicas, en la Universidad de Portugal, se desarrolla el Modular Autonomous Robot for Environment Sampling (MARES), para seguir trayectorias predefinidas y llevar a cabo la recolección de datos relevantes del medio ambiente (Cruz, 2008) (Ramos, 2008); el "Programme of the Commission of the European Communities", desarrollado con el objetivo de realizar mediciones medioambientales y la adquisición oceanográfica de datos en aguas costeras, y descubrimientos de embarcaciones hundidas (Gorset, 2010); el proyecto Cormorán (Ruiz, 2009) que propone el desarrollo de una plataforma de observación oceánica de bajo costo; el MARLIN en Inglaterra, para la evaluación tecnológica subacuática, (Tonge, 2000) desarrollado por BAE Systems para la Defense Evaluation and Research Agency (DERA); en las universidades y agencias de distintos países también se llevan adelante proyectos de esta naturaleza, como: en la Universidad BEIHANG", China (Liang, 2008); la Universidad de Zagreb, Croacia (Miskovic, 2008); la Universidad de Newcastle, Australia (Pérez, 2008); la Universidad de Girona, España (Palomeras et al., 2006), la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología" (NTNU) (Fossen, 1994, 2006, 2008); el Instituto de Problemas Tecnológicos Marinos de la Academia Rusa de Ciencias del Lejano Oriente" (IMTP FEB RAS) (Inzartsev, 2008), la Agencia de ciencia y tecnología de tierra y mar", Japón (Yoshida, 2008).

Existen proyectos desarrollados con fines científicos y aplicaciones específicas, como el R-One utilizado por la Universidad de Tokio, para el estudio y validación de estrategias de control (Kim, 2003); el MARIDAN desarrollados por Marine Science and Technology (MAST) y el Remote Environmental Monitoring Units (REMUS), que fue posible por un programa cooperativo entre la Naval Oceanographic Office, la Office of Naval Research y a la Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) en E.E.U.U, desarrollado para el mapeo del fondo marino, operaciones de búsqueda y rescate y muestreo científico (Gorset, 2010) y el HUGIN desarrollado por Kongsberg Maritime y Forvarets Forskning Institute (FFI) de Noruega para el mapeo de alta

precisión del fondo marino, vigilancia y reconocimiento de minas (Gorset, 2010); la Universidad de Florida dirige el proyecto Subjugator desde el Machine Intelligence Laboratory. El Subjugator es un mini-submarino sumergible tipo ROV, con capacidades autónomas; la Universidad de Carolina del Sur dirige la USC Robotics Society, dentro de la cual se desarrolla el SeaBee, un vehículo autónomo sumergible; la Fundación AUVSI – Association for Unmanned Vehicle Systems International (<http://www.auvsi.org>), promueve la investigación científica en el área por medio de diferentes eventos como la competencia RoboSub.

Estos grupos remarcan la importancia actual del desarrollo científico y tecnológico en este rubro y proveen sólidos antecedentes para la innovación en autonomía subacuática. En general, estos emprendimientos son encarados por universidades o institutos de investigación con estudios centrados en Inteligencia Artificial. Asimismo, AUVSI se ha establecido en 60 países, cuenta con más de 2.000 miembros y constituye una organización sin fines de lucro cuya misión es fomentar, promover y dar apoyo a las comunidades y proyectos de investigación e innovación en el campo de sistemas no tripulados y actividades asociadas a la robótica, vinculadas a sectores civiles, comerciales y de la defensa. Actualmente más de doscientos AUVs se encuentran funcionando en el mundo; y existe un importante número de compañías comerciales que ofrecen sistemas de AUV listos para usarse en aplicaciones específicas.

3. Clasificación de los vehículos sumergibles autónomos

Básicamente una embarcación marítima no tripulada consiste en un vehículo con capacidad de desplazarse sobre o por debajo de la superficie del agua con un cierto nivel de autonomía integrada. Esto comprende desde vehículos totalmente telecontrolados (ROV), hasta dispositivos con comportamiento “inteligente” (AUV). Su estructura comprende una serie de sensores que le permiten captar en tiempo real los cambios que se desarrollan en su entorno, un grupo de actuadores que le posibilitan actuar en ese mismo entorno y un componente de interface de usuario implementado en una estación de trabajo que le posibilita interactuar con el operador. El grado de “autonomía” se lo da su capacidad para “tomar decisiones” y está íntimamente relacionado con el grado en que el operador interactúa con el equipo, esto es, frecuencia y complejidad de la comunicación operador-equipo.

En la actualidad la principal manera de clasificarlos es de acuerdo a su nivel de autonomía. Como ya se observó con anterioridad existen vehículos

completamente autónomos y otros que deben ser controlados continuamente por un operador, los AUVs y los ROVs, respectivamente. Se pueden mencionar también dentro de esta clasificación, los Vehículos Submarinos Autónomos para Intervenciones, IAUVs, estos se encuentran en una fase inicial de desarrollo en un nivel intermedio de autonomía, ya que requieren de un Control Supervisado o de un operador. Se espera que estos lleguen a ser completamente autónomos y solo requieran que el operador defina al inicio la misión a realizar mediante comandos de alto nivel.

3.1. Vehículos Submarinos Operados Remotamente, ROVs

Los robots submarinos operados remotamente (ROVs, *Remotely Operated Vehicle*) están conectados a la superficie mediante un conjunto de cables, que permite el intercambio de datos y la alimentación de energía. A través de una computadora el operador situado en la superficie define los comandos que el equipo deberá ejecutar. El ROV envía las señales de sus sensores como presión, temperatura, imágenes, al a través de los cables para que el operador disponga de los mismos según sus requerimientos. En la actualidad las instalaciones petroleras o de gas hacen un profundo uso de estos servicios. El trabajo realizado por los ROV, en estructuras submarinas de inspección e intervención para realizar las operaciones de perforación, apertura y cierre de válvulas, reparar o remplazar componentes submarinos, y realizar una variedad de tareas requeridas para la producción es de alto requerimiento.

Las tareas realizadas a grandes profundidades dificultan el manejo de estos vehículos ya que son mayores las fuerzas de arrastre que se ejercen sobre la superficie del cable, para estas situaciones se desarrolló un Sistema de Manejo de Cable (TMS, por las siglas en inglés de *Tether Management System*) que se ancla en el fondo marino y soporta las fuerzas de arrastre del cable que va desde la embarcación en la superficie al TMS y a la vez permite que el ROV navegue con más facilidad.

3.2. Vehículos Submarinos Autónomos, AUVs.

Los *vehículos* submarinos autónomos (AUVs), poseen una arquitectura de control que les permite realizar misiones sin la supervisión de un operador. Además contienen su propia fuente de energía generalmente. Sus tareas y misiones son programadas en forma predefinidas. Cuando se requiere un intercambio de información con la superficie, la comunicación comúnmente se realiza a través de dispositivos acústicos.

Estos equipos no presentan las limitaciones impuestas por los cables de los ROVs para algunas tareas. Los AUVs se utilizan actualmente para tareas de exploración científica, muestreo oceanográfico, arqueología submarina y exploración siendo de gran importancia en exploración debajo del hielo. Los datos que recopila el vehículo son almacenados en la memoria interna del equipo para luego ser analizados.

Como ya se mencionó con anterioridad, también son muy utilizados en operaciones militares y vigilancia submarina. Si bien hoy en día muchos de ellos son experimentales esta tecnología está creciendo rápidamente y algunas empresas ya ofrecen servicios con este tipo de vehículos.

3.3. Vehículos Submarinos Autónomos para Intervenciones, IAUVs.

Si bien los AUVs han sido diseñados para realizar misiones de observación en los últimos años se ha generado un interés en que estos puedan realizar tareas de manipulación. Con estos vehículos submarinos autónomos para intervención (IAUVs, por sus siglas en inglés) las misiones serían más económicas que en el caso de los ROVs, y su maniobrabilidad sería superior ya que el IAUV no tendría las restricciones que impone el cable de conexión.

Un vehículo de este tipo es el ALIVE que navega autónomamente hasta el lugar donde se realizará la intervención, una vez que llega a la posición deseada, cambia su operación a Control Supervisado y, mediante comunicación acústica, realiza las tareas de manipulación. Este equipo se realizó mediante el proyecto ALIVE (Evans et al., 2003), SAUVIM (Marani et al., 2009) y RAUVI (DeNovi et al., 2010). Otro vehículo perteneciente al proyecto RAUVI, el robot GIRONA 500 explora primero la zona de interés y toma información acústica y visual del fondo, posteriormente sube a la superficie donde la información recolectada es procesada para realizar una reconstrucción de la región explorada. Hasta el momento se han realizado solo pruebas experimentales con estos vehículos.

Otra forma de clasificar los equipos autónomos submarinos, es por el tipo de misión a realizar. Las misiones pueden ser en general de inspección o de manipulación (o intervención). La principal diferencia entre un equipo para realizar intervenciones y otro que solo realiza inspecciones, es que el primero debe poseer herramientas o un brazo robótico. La tarea para la que está diseñado un vehículo submarino define el tipo de sensores, software, estructura y sistemas de propulsión, con que deberá contar. El sistema de propulsión de un vehículo submarino define completamente los tipos de movimientos y maniobras que este puede realizar. Según la tarea o misión

para la cual hayan sido diseñados, los vehículos autónomos submarino puede clasificarse en dos grupos, los que realiza:

“Tareas de Inspección” las cuales se realizan durante la navegación del vehículo submarino. En este tipo de tareas no se necesitan mecanismos para interactuar con el ambiente. Las tareas de inspección pueden consistir en adquirir imágenes con una o varias cámaras; la obtención de datos de la cartografía acústica o de la calidad del agua, y la inspección de instalaciones submarinas, como estructuras, tuberías, etc.

“Tareas de Manipulación” en las que el equipo submarino interviene con brazos manipuladores o herramientas. Para el desarrollo de estas misiones se debe disponer de un sistema de visión en tiempo real (en el caso de ROVs), que proporciona al operador las imágenes en directo del entorno de operación. Las tareas más comunes de manipulación son el mantenimiento de estructuras subacuáticas; la apertura y cierre de válvulas; la desactivación de minas; la recolección de muestras para estudios arqueológicos, geológicos o ecológicos; siendo muy útiles en la intervención en desastres industriales para controlar las fugas de material contaminante o el apoyo en el rescate de personas.

4. Componentes de los AUV

Los AUV deben operar en algunos de los entornos más duros de la Tierra. Deben poder resistir los efectos del agua salada corrosiva, la presión de las profundidades del océano, temperaturas extremas, corrientes y clima impredecibles; la contaminación biológica en el entorno marítimo, la obstrucción y otros daños causados por microorganismos y otras pequeñas especies marinas que entran en contacto con los conectores y otros componentes electrónicos. Dependiendo del diseño del AUV, ya sea de inundación libre o completamente presurizado, varios de sus componentes pueden exponerse directamente al agua salada, la presión y la vida marina.

4.1. La estructura y el diseño

En un principio el diseño más difundido de las estructuras de soporte de AUVs, fue un diseño tubular. Esto se fundamenta en que las fuerzas de arrastre que se generan por su traslado son pequeñas cuando se comparan con otras geometrías. Además la forma tubular es adecuada para resistir la presión hidrostática generada a grandes profundidades (Ross, 2006). Por otro lado,

esta geometría hace que su manufactura sea relativamente simple y esto a su vez tenga consecuencias favorables en el costo.

En la actualidad estos diseños son variados adaptándose principalmente a sus aplicaciones. Si bien la forma externa del vehículo es de suma importancia para la determinación de sus parámetros de navegación, no es necesariamente esta estructura la de los compartimientos internos que alojan los equipos eléctricos y electrónicos del AUV.

Una parte elemental del diseño del cuerpo del vehículo es la forma del extremo frontal. Ya que un extremo frontal plano no sería aconsejable para un equipo que realice tareas a altas velocidades, debido a que en las aristas de la cara frontal se produciría el fenómeno de cavitación lo que podría provocar la erosión del material de la cubierta y su posterior ruptura.

Otro aspecto importante del diseño de la cabina es el tipo de material. Los diferentes tipos de materiales mayormente utilizados en la construcción de vehículos submarinos son principalmente metálicos, compuestos y plásticos. (Wang et al., 2009). Una característica importante del material a usar, debido al medio en que se desplazan, es que sea altamente resistente y de bajo peso. Para cumplir estos requerimientos los materiales compuestos son los que mejor se adaptan, ya que muestran mejores propiedades que los materiales metálicos y los plásticos. Los principales materiales compuestos utilizados en el diseño de son los plásticos reforzados con fibra de vidrio (GFRP) siendo además el más económico (Wang et al., 2009) y con fibra de carbono (CFRP).

Otro material utilizado en vehículos submarinos que operan a profundidades de hasta un kilómetro es el acrílico. Es un material transparente y de alta resistencia. Se utiliza en las ventanillas que permiten la colocación de cámaras. El PVC es un material económico que se puede utilizar para construir vehículos submarinos que trabajan a profundidades pequeñas.

Dentro de los metales, se utiliza el titanio ya que posee la mayor relación resistencia/peso, le siguen el aluminio y el acero. Debido al costo del titanio el aluminio tiene una mejor relación resistencia/peso que el acero y su precio es asequible, sin embargo los equipos de aluminio deben ser convenientemente anodizados para evitar la corrosión.

4.1.1. Vehículos de inundación libre frente a vehículos presurizados

Las opiniones entre los diseñadores de AUV de hoy se dividen entre dos arquitecturas diferentes: vehículos presurizados y libres de inundación. Las arquitecturas de flujo libre permiten que el vehículo se llene de agua mientras se mantienen algunos componentes en compartimientos presurizados. Un

vehículo presurizado, por otro lado, es completamente hermético y presurizado como un submarino.

Los defensores de la inundación libre mencionan la facilidad de reparación y reemplazo porque pueden intercambiar componentes en la cubierta antes de que todo esté completamente seco. Esto proporciona más tiempo de actividad que un vehículo presurizado. Aquellos que prefieren vehículos presurizados señalan que pueden usar diferentes componentes que no tienen que ser reforzados para resistir el mar y las condiciones del tiempo. En lugar de utilizar conectores grandes y extremadamente resistentes, pueden utilizar conectores más pequeños diseñados para entornos relativamente benignos para espaciar y abrir más opciones para la arquitectura interna del vehículo.

4.2. Sensores e instrumentación

Los vehículos submarinos están equipados con sistemas de sensores dedicados a determinar la localización del vehículo, su velocidad y aceleración, así como su estado de funcionamiento. Los sensores permiten controlar sus movimientos, lo cual a su vez permite que el AUV pueda realizar la tarea que le fue definida. Estos sensores se pueden clasificar como sensores de Posicionamiento, Estado interno y Medición del ambiente.

Los principales sensores en general de un AUV son un sensor de profundidad, una brújula y un sensor de velocidad. Con estos sensores el vehículo puede estimar su posición. Es deseable equipar el vehículo con un registro de velocidad Doppler para aumentar la precisión de las estimaciones. Sistemas de navegación inercial con láser o giroscopios de fibra óptica son más caros, pero también más precisos que los sensores de velocidad estándar. Se pueden utilizar sondas, cámaras submarinas o fibras ópticas para la detección de obstáculos.

Es esencial que un AUV conozca su posición actual. Para calcular esa posición son necesarios varios sensores. El sensor más común es un sensor de presión que se utiliza para medir la presión externa experimentada por el vehículo. Esta presión se puede convertir en profundidad. Para una navegación a estima, se necesita la velocidad del vehículo. Existen numerosas formas de medir la velocidad del vehículo. Por lo general, la velocidad se mide con una brújula y un sensor de velocidad en el agua que puede medir la velocidad del vehículo utilizando partículas que están presentes en el agua. La velocidad de las partículas se mide con elementos ópticos difractivos. Las partículas pequeñas atraviesan dos láminas de luz paralelas y dispersan la luz. La luz dispersa se recoge y la velocidad de las partículas se calcula utilizando el tiempo y la separación física de las dos láminas de luz. Los sensores son pequeños, muy

precisos e insensibles a los cambios de temperatura y presión del agua. El problema con estas técnicas es que las corrientes marinas pueden agregar componentes de velocidad que no son detectados por el sensor de velocidad.

Para operaciones cerca del lecho marino, se pueden usar registros de velocidad Doppler con un Velocímetro Doppler de navegación (DVL), para medir la velocidad del vehículo con respecto al suelo. Con estas mediciones, la precisión de la estimación de la posición mediante el filtro de Kalman puede mejorar enormemente. Un DVL mide el desplazamiento Doppler de las señales del sonar reflejadas por el suelo para obtener la velocidad. El sistema se vuelve menos preciso a bajas velocidades. El registro de velocidad de correlación (CVL) se basa en el mismo principio que el DVL, pero emite dos pulsos en sucesión cercana. Los ecos del lecho marino se comparan y se utilizan para calcular la velocidad. Esta técnica es más precisa a bajas velocidades. Ambos sistemas no están influenciados por las corrientes marinas.

El sistema de navegación inercial (INS) utiliza acelerómetros y sensores giroscópicos para detectar la aceleración del vehículo. Las mediciones no están influenciadas por las corrientes marinas y, por lo tanto, son más precisas. Sin embargo, el sistema es más caro que los sensores de velocidad. Los INS suelen estar equipados con giroscopios mecánicos. El INS más actual utiliza giroscopios láser o giroscopios de fibra óptica que no tienen partes móviles. Esto significa que no hay fricción, lo que conduce a una mayor precisión. La fusión de sensores se utiliza para proporcionar más precisión al INS. Un filtro de Kalman de estado de error estima la deriva de los sensores inerciales, utilizando información externa como medida, un DVL y actualizaciones de posición por parte de una nave nodriza. Con el uso de más sensores para varios parámetros, se logra una mayor precisión.

Otro aspecto para el que se necesitan sensores es la detección de obstáculos. El vehículo debe poder detectar obstáculos antes de chocar contra ellos. Las cámaras subacuáticas y el sonar activo son dos de los sensores más comunes para la detección de obstáculos. Debe haber al menos dos sensores, porque en un entorno submarino la información de un sensor puede ser de mala calidad. Por tanto, en la técnica propuesta tanto la información del sonar como la cámara se utilizan para la detección de obstáculos. Los sistemas de sensores ultrasónicos / acústicos permiten la detección de objetos mucho más allá del rango de video. Los AUV actuales detectan objetos con sonar de largo alcance. Las ondas de baja frecuencia sufren menos atenuación en el agua que las de alta frecuencia. Sin embargo, la resolución de los sonares de imágenes es mejor a frecuencias más altas.

Existe una técnica que utiliza fibras ópticas para la detección de objetos. Se utilizan dos sensores diferentes: uno proporciona información sin contacto, el

otro proporciona información mediante el contacto con el objeto. El primero es un sensor extrínseco que transmite luz desde el extremo del sensor, si hay un objeto, la luz se reflejará y será recibida por un detector. El segundo sensor es un sensor intrínseco que no transmite la luz, pero contiene la luz dentro de la fibra. Una deformación de la fibra, si la fibra toca un objeto, tiene un efecto detectable sobre la luz dentro de la fibra.

Los sensores de Medición del ambiente son los que el AUV puede utilizar para determinar las características del agua que los rodea, algunos de estos miden variables como: conductividad, pH, densidad, turbidez, oxígeno disuelto, temperatura, presencia de metales, etc. Otra clase de dispositivo muy importante, empleado para caracterizar el fondo marino, es el Sonar. Este dispositivo consiste en uno o varios emisores o proyectores acústicos y uno o varios receptores o hidrófonos. Por la transmisión de la señal acústica ultrasónica, se determina la distancia de los objetos detectados, de acuerdo a la velocidad y el tiempo recorrido por el sonido en el agua. Los sonares se pueden utilizar para estimar la distancia a un objeto, por ejemplo (icebergs, submarinos etc.), generar imágenes del fondo marino para arqueología submarina y realizar mapas batimétricos.

4.3. Sensores para orientación y comunicaciones

El océano no solo es peligroso para los AUV, sino que también puede limitar el rendimiento de los sensores y las comunicaciones de estos. Su entorno operativo requiere que los AUV utilicen una combinación de sensores de navegación acústicos e inerciales mientras están bajo el agua. Los AUV deben emerger de vez en cuando para verificar sus posiciones con un sistema de posicionamiento global (GPS); su precisión no es perfecta, pero permite determinar la posición de un objeto en cualquier parte del mundo. Estos se utilizan en las embarcaciones que apoyan a los ROV o en los Planeadores acuáticos para poder localizarlos cuando emergen a la superficie del mar. No puede ser usado por debajo del agua.

Las comunicaciones acústicas tienen un ancho de banda notoriamente bajo y tienen problemas de propagación por trayectos múltiples y atenuación de la señal. Aunque los expertos de AUV han buscado y probado otras formas de comunicación submarina (ej.: laser), ninguna ha sido tan versátil como la acústica. Debido a la dificultad de la comunicación, la industria de los AUV tiene como objetivo diseñar AUV que puedan funcionar sin interacción humana. El Vehículo Submarino Autónomo Flotante Bluefin (HAUV) está diseñado para inspeccionar los cascos de los barcos de manera más rápida y eficiente que los buzos humanos.

4.4. Sistemas de Visión

Las cámaras de video se utilizan para obtener imágenes del lugar donde se está realizando la operación de los vehículos. Son muy útiles para tomar fotografías o videos de la zona que se está explorando. Otra importante aplicación de los sistemas de visión es el seguimiento por visión de tuberías y el control de la posición. La tecnología de los sistemas de visión óptica se encuentra muy desarrollada, lo cual permite la obtención de imágenes con alta resolución y el procesamiento en tres dimensiones. No obstante, como su nitidez depende del grado de turbidez del agua, existe un gran interés en la solución de este problema. Es por esto que algunos trabajos de investigación se han enfocado en la búsqueda de su solución mediante el uso de ondas acústicas, para la obtención de imágenes submarinas, debido a que el sonido presenta menor atenuación que la luz en el agua.

4.5. Sistemas de propulsión

Los sistemas de propulsión son los dispositivos que permiten que los vehículos submarinos se desplacen en un medio acuático. La mayoría de los sistemas de propulsión consisten de impulsores de hélice, aletas móviles para el guiado, y sistemas de lastre.

Los sistemas de empuje con hélice y motor son los más utilizados, estos consisten generalmente en un motor eléctrico, al que se le acopla una hélice. Al girar la hélice produce un efecto de empuje al desplazar el fluido de adelante hacia atrás, debido a la diferencia de presión producida. Las prestaciones que ofrece el impulsor de hélice han hecho de este sistema de propulsión el más utilizado, sin embargo estos dispositivos producen ruido en el ambiente marino, esto altera en cierta medida la vida acuática (Low and Willy, 2005), es por ello que en el desarrollo de ciertos vehículos submarinos se proponen otros sistemas de propulsión. Por ejemplo, el Impulsor y superficies de control, se usa en submarinos de gran envergadura y AUVs. Estos utilizan aletas o timones con un solo grado de libertad para obtener los movimientos de cabeceo, viraje y balanceo. Este sistema presenta una gran simplicidad, pero la maniobrabilidad es muy reducida, especialmente a baja velocidad.

Si bien los impulsores de mayor importancia para ejecutar la navegación se colocan en la parte trasera o a los lados de los vehículos submarinos, una configuración muy utilizada en los AUVs es la que permite dotar a los mismos de seis grados de libertad, por ejemplo la que posee el robot ODIN II (Yuh et

al., 1999). Esta ubicación u otras similares de los impulsores permiten trabajos de manipulación e inspección por su precisión en el posicionamiento.

4.6. Fuentes de Energía

La fuente de energía es uno de los componentes más críticos en los AUVs, ya que el tipo de fuente de energía define el tiempo de operación del equipo, además del volumen y peso del vehículo. Las principales fuentes de energía son las baterías, las cuales están compuestas por celdas electroquímicas que convierten la energía química almacenada en energía eléctrica. Las baterías mayormente utilizadas en los AUVs son las baterías recargables. Aunque hasta hace poco tiempo, se usaban las de Plata-Zinc, con los avances en el campo de las baterías de Li-Ion, en la actualidad son las que se utilizan mayormente (Wang et al., 2009).

5. Evolución del manejo de los Vehículos Autónomos Submarinos, AUVs

Los primeros ROV tenían sistemas de control de movimiento bastante primitivos. Con los propulsores controlados de forma independiente, un operador experimentado necesitaba un gran esfuerzo para controlarlo. El control de profundidad automático facilitó considerablemente el funcionamiento de los ROV, ya que un ROV raramente flota. Con la asignación de propulsores y una brújula electrónica, también fue posible incluir el control automático de rumbo. La profundidad desacoplada y el control del rumbo han sido las funciones de automatización estándar para el posicionamiento de ROV durante décadas y todavía lo son. Como no existen sistemas de posicionamiento Global (GPS) que trabajen bajo el agua, se necesitan otros medios para encontrar una posición precisa adecuada para retroalimentar a un controlador de posición. La solución estándar ha sido utilizar sistemas de posicionamiento acústico para obtener una solución de posición absoluta. Sin embargo, estos pueden ser imprecisos y "vacilantes" y la velocidad de actualización es lenta. Cuando el registro de velocidad Doppler (DVL) llegó en los años 80, era un sensor revolucionario para vehículos submarinos y navegación ya que podía medir la velocidad en el chasis del vehículo con alta precisión y tasas de actualización. El DVL se convirtió en un sensor muy popular para vehículos submarinos.

Los primeros ROV de trabajos comerciales para usar otras funciones automáticas que no sea el control de la profundidad y el rumbo automáticos

no llegaron hasta el comienzo del milenio. Schilling Robotics con su función automatizada StationKeep introducida en 2001 permitió mantener la posición del ROV. A partir de 2011 StationKeep incluye la capacidad de mantenimiento de la funcionalidad de la estación a media agua cuando el DVL está fuera de rango. Oceaneering, otro gigante en la fabricación de ROV, se asoció con Sonardyne , una importante compañía de navegación submarina, para entregar su solución de posicionamiento de ROV automatizada; el sistema Fly-by-wire (FBW), que se presentó en el otoño de 2012. En un comunicado de prensa del 28 de noviembre de 2012 Oceaneering, afirmó que el FBW proporcionaba DP (Posicionamiento Dinámico) en todas las profundidades de agua, sin afectar la confiabilidad o la facilidad de uso.

SeeByte también ha entregado su sistema de posicionamiento SeeByte Co-Pilot a los ROV de trabajo de SMD. El SeeByte CoPilot es un sistema de posicionamiento automático que se puede adaptar a cualquier ROV que cumpla con los requisitos de SeeByte sobre especificación de sensores y configuración del propulsor.

A medida que los sensores y los instrumentos se volvieron cada vez más pequeños y baratos, fue más sencillo tener disponible el posicionamiento automático. Teledyne BlueView y SeeByte crearon su sistema de control de posicionamiento "clic y listo" llamado VideoRay CoPilot. Además del mantenimiento de estación marítima, CoPilot puede rastrear patrones de reconocimiento/inspección predefinidos o usar el reconocimiento automático de objetos, basado en datos de un sonar de haces múltiples BlueView, para encontrar y mantener una posición relativa a un objetivo.

6. Innovación en la tecnología AUV

Se ha demostrado que los vehículos de inspección autónomos o no tripulados (AUV) tienen un impacto positivo en sus proyectos en alta mar al reducir los costos, el cronograma, el riesgo y la logística. La nueva generación de AUV de clase ligera ha mejorado estos beneficios sin ninguna compensación por la precisión, resolución o calidad de los datos.

6.1. Los Vehículo Submarino Autónomo de clase ligera (LAUV)

Los AUV de clase liviana son versátiles, lo que les permite operar de manera segura en aguas poco profundas donde pueden navegar fácilmente alrededor de obstáculos como rocas y bajíos sin dañar el equipo o crear riesgos para la

seguridad. Los AUV de clase liviana también cuentan con una alta maniobrabilidad, lo que les permite operar en espacios reducidos cerca de tuberías, cables y otros equipos sin riesgo de colisión con otras embarcaciones en el sitio; esto significa menos interrupciones causadas por mover equipos pesados durante el trabajo de instalación también.

Esta tecnología innovadora desafía directamente las técnicas de levantamiento tradicionales basadas en embarcaciones, ROV y AUV más prominentes, brindando datos de levantamiento, resolución o calidad de alta precisión con reducciones significativas en el costo, el tiempo y el riesgo del proyecto. Otro beneficio es que se pueden implementar rápidamente sin requerir capacitación especializada, a diferencia de los métodos tradicionales, que requieren una amplia capacitación antes de su uso en los sitios de trabajo para que puedan operar de manera segura junto a los miembros de la tripulación de los barcos.

El principal concepto innovador de diseño del LAUV fue el despliegue de un vehículo ligero que puede ser lanzado, operado y recuperado fácilmente con una mínima configuración operativa por parte de usuarios regulares y sin ninguna formación previa compleja para realizarlo. Para lograr completamente este concepto, los LAUVs son vehículos livianos cuyo peso es menor a 20 kg; todos sus componentes principales son comerciales listos para usar y su selección respeta una metodología que implica un minucioso estudio de mercado para identificar la mejor relación precio/resultados disponibles. En general la estructura mecánica está muy simplificada para reducir los costos de producción sin que por eso pierda las condiciones de robustez y confiabilidad por lo cual la selección de sus componentes electrónicos debe ser eficiente.

Generalmente su diseño es modular, a partir de un sistema funcional básico que incluye comunicaciones, sistema computacional y sensores de navegación (GPS y sensor de profundidad), una de sus principales ventajas es que su diseño está orientado para permitir la intervención futura del usuario del LAUV lo cual facilita adaptar sus capacidades agregando módulos específicos. En un futuro se espera que dispongan en forma comercial de sistema abierto de arquitecturas de hardware y software, lo que permitiría al usuario con la documentación adecuada agregar sus propios sensores y/o algoritmos de software.

El LAUV es un vehículo liviano, portátil para un solo hombre, lo que permite el despliegue de un solo usuario desde pequeñas embarcaciones de trabajo o directamente desde la costa. Especialmente diseñado para ser una herramienta topográfica altamente operativa y efectiva para aplicaciones oceanográficas, hidrográficas, de seguridad e inspecciones. Con los desarrollos de última generación en control, navegación y comunicaciones, y

también mediante la integración de los desarrollos más recientes en sensores, computación y tecnologías de comunicaciones y con la ayuda de la cadena de herramientas de software los LAUV están evolucionando rápidamente para minimizar la distancia entre la teoría y las operaciones al permitir conceptos de operación que antes solo podrían haberse imaginado.

La operación de los LAUVs no requiere una capacitación extensa del operador, es una herramienta topográfica asequible, altamente operativa y eficaz. Disponen de un sistema funcional básico que incluye comunicaciones, sistema computacional y sensores de navegación básicos, las capacidades de los LAUVs se construyen agregando módulos de carga útil opcionales. Estos vehículos subacuáticos autónomos son robustos, eficaces y ligeros. Están diseñados para ser simples de implementar, operar y recuperar por una sola persona. La arquitectura abierta de última generación que poseen permite a los usuarios integrar fácilmente nuevos instrumentos, actuadores, algoritmos y comportamientos. Su sistema funcional básico incluye un sistema computacional, comunicaciones por radio y sensores básicos de navegación, y las capacidades del LAUV se acumulan agregando módulos opcionales de navegación, comunicaciones y carga útil.

Una cadena de herramientas de software permite la creación rápida de prototipos y la evaluación de nuevos conceptos de operación para sistemas de vehículos en red (Dias et al., 2008). Por ejemplo Neptus/IMC/Dune dotan al LAUV de capacidades de red únicas, lo que permite interacciones transparentes con múltiples usuarios y con otros sistemas de vehículos aéreos y marítimos. Este marco de software avanzado, pero fácil de usar, cubre todas las diferentes etapas del ciclo de vida de la misión: configuración, planificación, simulación, ejecución y análisis de datos posterior a la misión.

El LAUV y sus evoluciones más recientes con respecto a la navegación, el seguimiento del fondo y los algoritmos para evitar obstáculos, el marco de comando y control y las capacidades de red lo convierten en un sistema rentable e innovador destinado a estudios oceanográficos, hidrográficos y de seguridad y vigilancia. Algunas de sus principales aplicaciones son:

- Seguridad y Vigilancia: Capaz de realizar vigilancia submarina, contramedidas de minas, guerra antisubmarina o seguridad portuaria utilizando sensores como cámaras, ecosondas y sonares de exploración.
- Oceanografía: recopila datos biológicos, como salinidad, temperatura, turbidez u oxígeno disuelto de un área y crea mapas 2D y 3D.
- Hidrografía: Capaz de mapear áreas con sonar para encontrar cualquier tipo de objetivo, como naufragios, sitios arqueológicos o cualquier otra estructura sumergida.

- Navegación Inercial: Capaz de navegar independientemente de referencias externas.

El mercado potencial de los LAUVs se enfoca no solo en la venta y uso del LAUV, sino también en el leasing/alquiler de los servicios que el vehículo es capaz de realizar. Los servicios de arrendamiento pueden verse como una forma de probar las capacidades operativas antes de realizar una compra. Las principales ventajas que ofrecen para su rápida inclusión en el mercado son, su logística y operación de bajo costo, recopilación y visualización centralizadas de datos de múltiples sensores y vehículos, y la robustez de operación cerca y lejos de la costa.

Actualmente la empresa OceanScan–Marine Systems&Technology Lda., fabricante europeo de vehículos Submarinos autónomos portátil, se encuentra interesada en el desarrollo de estos vehículos. Su desarrollo está dirigido a oceanógrafos, ambientales. El equipo I+D de la empresa, se basa en una amplia experiencia en tecnologías de punta e ingeniería de sistemas para entregar innovadores servicios de ingeniería avanzada y operativos apoyo a estos sistemas oceánicos. El sistema LAUV fue desarrollado en Laboratorio de Sistemas y Tecnología Subacuática (LSTS) de la Universidad de do Porto en cooperación con OceanScan-MSTL. (Sousa, Madureira-*MTS/IEEE OCEANS* - 2013).

7. El futuro de los AUV

Los AUV hoy en día siguen siendo una tecnología emergente que está lejos de estar madura. Prácticamente cualquier mejora tecnológica relacionada con los AUV puede optimizar todo el sistema, ya sean progresos en el software, el hardware de la computadora, las comunicaciones acústicas o la navegación inercial, los AUV del futuro serán capaces de realizar misiones muy diferentes.

El desarrollo de prototipos de sistema de propulsión y potencia para futuros AUVs de larga duración está en marcha. La Oficina de Investigación Naval de los Estados Unidos (ONR) en Arlington, Virginia, ha pedido a ingenieros de dos diseñadores de vehículos submarinos que desarrollen un prototipo de sistema de propulsión y energía para la próxima generación de vehículos submarinos no tripulados para operaciones de larga duración.

Las empresas, NexTech Materials Ltd. en Lewis Center, Ohio, y Lynntech Inc. en College Station, Texas, construirán prototipos de sistemas de propulsión y potencia AUV que miden 30 pulgadas de largo por 18,5 pulgadas de diámetro y que entregan de 42 a 68 kilovatios hora. de energía durante no menos de 30

horas. El vehículo para el que se está diseñando este sistema de propulsión y energía será una embarcación presurizada en lugar de inundación libre. NexTech Materials se especializa en óxidos complejos de alto rendimiento para celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) y aplicaciones de catálisis. La compañía tiene una instalación piloto dedicada a construir SOFC y sensores electroquímicos. Lynntech se enfoca en energía y potencia, sistemas integrados, materiales, ciencias industriales y ciencias de la vida con recursos que incluyen laboratorios analíticos, modelado computacional, instrumentación, mecanizado y fabricación.

El sistema que están desarrollando NexTech y Lynntech se basa en tecnología de pilas de combustible en lugar de baterías tradicionales. Las pilas de combustible que se utilizan tienen una membrana de circonio con electrodos a cada lado. Los diseñadores colocan oxígeno en un lado y combustible JP10 en el otro. La reacción de estos dos componentes crea electricidad, con un biproducto de hidrógeno, monóxido de carbono, agua y dióxido de carbono. La corriente que crea la reacción proporciona energía siempre que la membrana tenga combustible y oxígeno. La tecnología involucrada en este sistema será escalable, lo que permitirá su uso para AUV que son más grandes y más pequeños que el vehículo de prueba de 21 pulgadas de diámetro que se está utilizando.

8. Bibliografía

- Acosta, G., Curti, H., Calvo, O., Rossi, S., 2008. Some issues on the design of a low-cost autonomous underwater vehicle with an intelligent dynamic mission planner for pipeline and cable tracking. In: Inzartsev, A. (Ed.), *Underwater Vehicles*. InTech, Ch. 1, pp. 1–19.
- Amat, J., Escote, O., Frigola, M. and Giralt, X., Hernansanz, A., 2006. Milana: a lowcost glider used for building a map of barcelona sea bed. In: *Robotics and Automation in the Maritime Industries AUTOMAR*, Madrid, Spain. pp. 295–304.
- Anderson, J. M., Chabra, N. K., 2002. Maneuvering and stability performance of a robotic tuna. *Integrative and Comparative Biology* 42 (1), 118–126.
- Antonelli, G., 2003. *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator*. Springer-Verlag.
- Antonelli, G., Fossen, T. I., Yoerger, D. R., 2008. *Underwater Robotics*. In: Siciliano, B., Khatib, O. (Eds.), *Springer Handbook of Robotics*. Springer
- Antonelli, Gianluca (2008). *Handbook of Robotics*. Springer.
- Bachmayer, R., Whitcomb, L., Grosenbaugh, M., 2000. An accurate four quadrant nonlinear dynamical model for marine thrusters. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (1), 146 – 159.
- Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Ch. 44, pp. 987–1008.
- Boyer, F., Chablat, D., Lemoine, P., Wenger, P., 2009. The eel-like robot. In: *Proceedings of the ASME IDETC/CIE 2009*, San Diego, USA.
- Bradley, A., Feezor, M., Singh, H., Sorrell, F., 2001. Power systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (4), 526538.
- Caffaz, A., Caiti, A., Casalino, G., Turetta, A., 2010. The hybrid glider/auv folaga. *Robotics Automation Magazine*, IEEE 17 (1), 31 –44. DOI: 0.1109/MRA.2010.935791
- Cañizares, J.R.(2010). *Modelado y control del vehículo autónomo sumergible del CIDNAV*. Universidad Central de las Villas (UCLV).
- Cavallo, E., Michelini, R., Filaretov, V., 2004. Conceptual design of an auv equipped with a three degrees of freedom vectored thruster. *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 39 (4), 365–391.
- Chen, I., Li, H., Cathala, A., 1999. Design and simulation of amoebot a metamorphic underwater vehicle. In: *Proceedings of the International Conference of Robotics and Automation*. pp. 90–95.

- Chi, T. C. (1998). *Linear System. Theory and Design*, 3ra edition. Conference of Robotics and Automation. pp. 181–187.
- Cruz, Nuno A.; Matos, Aníbal C. (2008). *The MARES AUV, a modular autonomous robot for environment sampling*. technical report. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Datardina, SP, JJ Du Croz, SJ Hammarling andMWPont (1992). A proposed specification of blas routines in c. *The Journal of C Language Translation* 3(4), 295-309.
- Davis, Russ E.; Eriksen, C. C., Jones, C., 2002. *Autonomous buoyancy-driven underwater gliders. The Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. G.Griffiths, ed., London, England.
- De la Cruz Garcia, J. M., Almansa, J. A., Sierra, J. M. G., 2012. *Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control*. R. Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 9(3), 205– 218.
- DeBitetto, P., 1995. Fuzzy logic for depth control of unmanned undersea vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 20 (3), 242 – 248.
- DeNovi, G., Melchiorri, C., Garcia, J., Sanz, P., Ridao, P., Oliver, G., 2010. A new approach for a reconfigurable autonomous underwater vehicle for intervention. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 25 (11), 32–36.
- Desset, S., Damus, R., Hover, F., Morash, J., Polidoro, V., 2005. Closer to deep underwater science with odyssey iv class hovering autonomous underwater vehicle (hauv). In: *IEEE Oceans 2005 - Europe*. Vol. 2. pp. 758 – 762.
- Dongarra, Jack J, Jeremy Du Croz, Sven Hammarling and Iain S Du_ (1990). A set of level 3 basic linear algebra subprograms. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 16(1), 1-17.
- Dudek, G., Giguere, P., Prahacs, C., Saunderson, S., Sattar, J., Torres-Mendez, L.-A., Jenkin, M., German, A., Hogue, A., Ripsman, A., Zacher, J., Milios, E., Liu, H., Zhang, P., Buehler, M., Georgiades, C., 2007. Aqua: An amphibious autonomous robot. *Computer* 40 (1), 46 –53. DOI: 10.1109/MC.2007.6
- Evans, J., Redmond, P., Plakas, C., Hamilton, K., Lane, D., 2003. Autonomous docking for intervention-auvs using sonar and video-based real-time 3d pose estimation. Vol. 4. pp. 2201 – 2210.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons.. Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, T. I.; Strand, J. P. (1999). *Passive nonlinear observer design for ships using lyapunov methods: Full-scale experiments with a supply vessel*. Elsevier Science Ltd.

- Fossen, T. I.;Pérez, T. (2009). Kalman filtering for positioning and heading control of ships and o_shore rigs. IEEE Control Systems.
- Fossen, T., (1991). Nonlinear modeling and control of underwater vehicles. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Fossen, T., (2002). Marine Control Systems. Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics.
- Fossen, T., Sagatun, S., (1991). Adaptive control of nonlinear underwater robotic
- Fossen, Thor I. (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles. Wiley & Sons. Pub.Nueva York, Estados Unidos.
- Fossen, Thor I. y Ross, A. (2006). Advances in unmanned marine vehicles. Chap. Nonlinear modelling, identi_cation and control of UUVs, pp. 13-42. Vol. 69. Peter Peregrinus LTD. Gran Bretaña.
- Fossen, Thor I.; Johansen, Tor A. y Perez Tristan (2008). Underwater vehicles. Chap. A survey of control allocation Methods for underwater vehicles, pp. 109-128. I-Tech. Viena, Austria.
- GADE,K., (2004) "NavLab, a Generic Simulation and Post-Processing Tool Navigation," European Journal of Navigation, v.2, no. 4, pp. 1-9, November. 2004.
- Galassi, M., J. Davies, J. Theiler, B. Gough, G. Jungman, P. Alken, M. Booth and F. Rossi (2009). GNU Scienti_c Library.
- Garcia-Garcia, Delvis, Yunier Valeriano-Medina, Luis Hernandez and Alain Martínez-Laguardia (2012).Wave filtering for heading control of an auv based on passive observer. IJMS 41, 540{549.
- García, D. (2010). Técnicas para el incremento de las prestaciones de los sistemas de navegación inercial de bajo costo para vehículos autónomos. Universidad Central de las Villas (UCLV).
- García, D. (2014). Desarrollo de técnicas de filtrado de las olas para la navegación y el control de un AUV. PhD thesis.
- Goheen, K., Jeffery, R., 1990. Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles. IEEE Journal of Oceanic Engineering 15 (3), 144–151.
- Gorset, Jon E. (2010). Nonlinear model-based control of slender body AUV s. Tesis doctoral. NTNU. Noruega.
- Graver, J., 2005. Undewater gliders: Dynamics, control and design. Ph.D. thesis, Princeton University, USA.

Griffiths, G., Ed., Davis, R. E., Eriksen, C. C., Jones, C. P., 2002. Autonomous buoyancy-driven underwater gliders. In: *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. Taylor and Francis, London, England.

Guerra, C.E. (2010). *Diseño e implementación de hardware y software de bajo nivel para vehículo submarino autónomo*. Universidad Central de las Villas (UCLV).

Guo, J., Chiu, F.-C., Huang, C.-C., 2003. Design of a sliding mode fuzzy controller for the guidance and control of an autonomous underwater vehicle. *Ocean Engineering* 30 (16), 2137 – 2155.

Guo, J., Huang, S., 1996. Adaptive control of nonlinear underwater robotic systems. In: *Proceedings of the Symp. on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. pp. 285–289.

Healey, A., Lienard, D., 1993. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 18 (3), 327–339.

Ibaraki, S., S. Suryanarayanan and M. Tomizuka (2001). H_∞ optimization of luenberger state observers and its application to fault detection filter design. In: *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001. Vol.2. pp. 1011-1016 vol.2.

Innocenti, M., Campa, G., 1999. Robust control of underwater vehicles: Sliding mode vs. lmi synthesis. In: *LMI Synthesis, American Controls Conference*. pp. 3422–3426.

Inzartsev, Alexander. y Pavin, Alexander. (2008). Underwater vehicles. Chap. AUV application for inspection of underwater communications, pp. 216-234. I-Tech. Viena, Austria.

Iwasaki, M., Akizono, J., Takahashi, H., Umetani, T., Nemoto, T., Azakura, O., Asayama, K., 1987. Development on aquatic walking robot for underwater inspection. *Report of the Port and Harbour Research Institute* 26 (5), 393–422.

Jacobson, Ivar, Grady. Booch and James. Rumbaugh (2000). *El Proceso Unificado de Desarrollo de Software*. Addison-Wesley.

Jordán, Mario A. y Bustamante, Jorge L. (2008). Underwater vehicles. Chap. Adaptive control for guidance of underwater vehicles, pp. 251-278. I-Tech. Viena, Austria.

Jouffroy, Jerome (2003). A relaxed criterion for contraction theory: Application to an underwater vehicle observer. In: *Proceedings of the European Control Conference*.

- Kim, E., Youn, Y., (2004). Design and dynamic analysis of fish robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, USA. pp. 4887 – 4892.
- Kim, Joonyoung, Kihun Kim, H.S. Choi, Woojae Seong and Kyu-Yeul Lee (2002). Estimation of hydrodynamic coefficients for an AUV using nonlinear observers. IEEE Journal of Oceanic Engineering 27(4), 830-840.
- Kim, Kangsoo. y Ura, Tamaki. (2003). Fuel-optimal guidance and tracking control of auv under current interaction. In: The thirteenth (2003) international offshore and polar engineering conference. The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Kinsey, J., Yoerger, D., Jakuba, M., Camilli, R., Fisher, C., Christopher, R., 2011. Assessing the deepwater horizon oil spill with the sentry autonomous underwater vehicle. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 261 – 267.
- Lawson, Charles L (1999). Background, motivation and a retrospective view of the blas..In: PPSC.
- Le Page, Y., Holappa, K., 2000. Simulation and control of an autonomous underwater vehicle equipped with a vectored thruster. In: OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. pp. 2129 –2134 vol.3.
- Liang, Jianhong.; Wei, Hongxing.; Wang Tianmiao y Wen Li. (2008). Underwater vehicles. Chap. Experimental research on biorobotic autonomous undersea vehicle, pp. 173-194. I-Tech. Viena, Austria.
- Lin, T., Gilbert, J., 1991. Analyses of magnetohydrodynamic propulsion with sea water for underwater vehicles. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Low, K. H., Willy, A., 2005. Development and initial investigation of ntu robotic fish with modular flexible fins. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. pp. 958–963.
- Lumsdaine, A. and Je_rey H. Lang (1990). State observers for variable-reluctance motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics 37(2), 133 -142.
- Mandt, M., Gade, K. & Jalving, B. (2001). "Integrating DGPS-USBL Position Measurement with Inertial Navigation in the HUGIN 3000 AUV," 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, pp. 63-74, Saint Petersburg, Russia, May. 2001.
- Marani, G., Choi, S. K., Yuh, J., 2009. Underwater autonomous manipulation for intervention missions auvs. Ocean Engineering 36 (1), 15 – 23.

Martínez, A. (2013a). Dynamic model aided inertial navigation for autonomous vehicle. Cuba-Flanders Workshop on Machine Learning and Knowledge Discovery, CF-WMLKD2010. Santa Clara, Cuba.

Martínez, A., Rodríguez Y. Hernández L. Lemus Ramos J.L. Guerra C.E. Hichem S. (2013b). Diseño de AUV. Arquitectura de hardware y software. Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind. 1.

Martinez, Alain, Yidier Rodriguez, Luis Hernandez, Carlos Guerra and Hichem Sahli (2010). Hardware and software architecture for AUV based on low-cost sensors. pp. 1428-1433. 00003.

Miklosovic, Robert, Aaron Radke and Zhiqiang Gao (2006). Discrete implementation and generalization of the extended state observer. In: American Control Conference, 2006. IEEE. pp. 6{pp.

Miskovic, Nikola.; Vukic, Zoran. y Barisic Matko (2008). Underwater vehicles. Chap. Identification of underwater vehicles for the purpose of autopilot tuning, pp. 327-346. I-Tech. Viena, Austria.

Morel, Y., Leonessa, A., 2003. Adaptive Nonlinear Tracking Control of an Underactuated Non-minimum Phase Model of a Marine Vehicle Using Ultimate Boundedness. In: 42nd IEEE Conference on Decision and Control.

Moreno, H. A., Puglisi, L. J., Saltaren, R. J., Carrera, I., 2011. Kinematic analysis of an underwater parallel robot. In: OCEANS 2011 IEEE Spain. pp. 1-6.

Morgúl, Omer and Ercan Solak (1997). On the synchronization of chaos systems by using state observers. International Journal of Bifurcation and Chaos 07(06), 1307-1322.

Newman, 1977. Marine Hidrodynamics.

Nie, J., Yuh, J., Kardash, E., Fossen, T. I., 1998. On-board sensor-based adaptive control of small uuv's in very shallow water. In: Proc. of IFAC-Control applications in Marine Systems. pp. 201-206.

Nijmeijer, H.; Fossen, T. I. (1999). New directions in nonlinear observers design. in: Lectures notes in control and information sciences. Springer-Verlag. Londres 244, 525.

Nomoto, K.; Taguchi, T.; Honda K.; Hirano S. (1957). On the steering qualities of ships. International Shipbuilding Progress.

Ogata, Katsuhiko (1998). Ingeniería de Control Moderna, 3ra Edición. Prentice Hall.

Palomeras, N., M. Carreras, P. Ridao and E. Hernandez (2006). Mission control system or dam inspection with an AUV. pp. 2551-2556.

Paster, D., 1986. Importance of hydrodynamic considerations for underwater vehicle design. *OCEANS* 18, 1413–1422.

Pérez, Tristan. y Fossen, Thor I. (2008). Joint identification of infinite-frequency added mass and fluid-memory models of marine structures. *Modeling, Identification and Control* 29(3), 93-102.

Polsenberg, A., Milano, M., Gsell, M., Fischer, K., 2005. Synthetic jet propulsion for small underwater vehicles. In: *Proceedings of the International*

Potter, M., Wiggert, D., Hondzo, M., 1998. *Mecanica de Fluidos*. Pretince Hall.

Powerflow, 2012. Web page software package. Online: <http://www.exa.com>.

Prats, M., Ribas, D., Palomeras, N., Garcia, J. C., Nannen, V., Wirth, S., Fernandez, J. J., Beltran, J. P., Campos, R., Ridao, P., Sanz, P. J., Oliver, G., Carreras, M., Gracias, N., Marin, R., Ortiz, A., January 2012. Reconfigurable AUV for intervention missions: A case study on underwater object recovery. *Journal of Intelligent Service Robotics* 5 (1), 19–31.

Ramos, Jorge Luis Lemus (2011). *Software de navegación y guiado en tiempo real para vehículo autónomo sumergible*. Universidad Central de las Villas (UCLV).

Ramos, Patricia. y Neves, Mario V. (2008). Underwater vehicles. Chap. Environmental impact assessment and management of sewage outfall discharges using AUVs, pp. 417-436. I-Tech. Viena, Austria.

Refness, J.; Sorensen, A. J.; Pettersen K. Y. (2007). A 6 dof nonlinear observer for auvs with experimental results. vol. 12. *IEEE Xplore*.

Ridao, P., J., Y., Battle, J., Sugihara, K., 2000. On auv control architecture. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 855–860.

Rodríguez, Y. (2010). *Sistema remoto de supervisión y configuración de autopiloto de vehículo autónomo subacuático*. PhD thesis. UCLV. Dpto. de Automática y Sistemas Computacionales. Santa Clara, Cuba.

Ross, C., 2006. A conceptual design of an underwater vehicle. *Ocean Engineering* 33 (16), 2087–2104.

Rossi, C., Colorado, J., Coral, W., Barrientos, A., 2011. Bending continuous structures with smas: a novel robotic fish design. *Bioinspiration & Biomimetics* 6, 045005.

Ruiz, Antonio Galo (2009). *Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV*. Universidad Politécnica de Catalunya.

Saltaren, R., Aracil, R., Alvarez, C., Yime, E., Sabater, J., sep. 2007. Field and service applications - exploring deep sea by teleoperated robot - an

underwater parallel robot with high navigation capabilities. *Robotics Automation Magazine*, IEEE 14 (3), 65–75.

Seaeeye, 2012. Web page Panther-XT. Online: <http://www.seaeeye.com/pantherxt.html>.

SNAME, 1950. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Technical and Research bulletin No. 1-5.

Snijders, J. G. (2005). Wave filtering and thruster allocation for dynamic positioned ships. Delft University of Technology. Santa Clara, Cuba.

Soroush, Masoud (1997). Nonlinear state-observer design with application to reactors. *Chemical Engineering Science* 52(3), 387-404.

Sousa Alexandre, Madureira Luis, "LAUV: The Man-Portable Autonomous Underwater Vehicle", *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*, Bergen, Noruega, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608189.

Strand, J. P. (2001). Position control systems for offshore vessels. *The Ocean Engineering Handbook*. Impresa e illustrada ed.. Vol. XV of Electrical engineering handbook series.

Strand, Jann Peter and Thor I. Fossen (1999). Nonlinear passive observer design for ships with adaptive wave filtering. In: *New Directions in nonlinear observer design* (H. Nijmeijer and T. I. Fossen, Eds.). pp. 113-134. Number 244 In: *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Springer London.

systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 1687–1695.

Tonge, A. (2000). Marlin, the UK military UUV programme|a programme overview. *Proceedings of the International UUV Conference*.

Torsetness, G.; Jouroy, J.; Fossen T. I. (2004). Nonlinear dynamic positioning of ships with gain-scheduled wave filtering. vol. 5. *IEEE Xplore*.

Tsay, Tain-Sou (2009). High accurate positioning technique for auv. *WSEAS Transactions on Systems and Control* 4(1), 55-64.

Valavanis, K., Gracanin, D., Matijasevic, M., Kolluru, R., 1997. Control architectures for autonomous underwater vehicles. *IEEE Control Systems* 17 (6), 48–64.

Valeriano-Medina, Y.; Martínez, A.; Hernández L.; Sahli H.; Rodríguez Y.; Cañizares J. R. (2013). Dynamic model for an autonomous underwater vehicle based on experimental data. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences* 19(2), 175-200.

- Van de Ven, P. W. J., Flanagan, C., Toal, D., Aug. 2005. Neural network control of underwater vehicles. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 18 (5), 533–547.
- Viegas, D, P Batista, P Oliveira and C Silvestre (2011). Linear motion observers for asc/auv tandems based on single range readings. In: *American Control Conference (ACC)*, 2011. IEEE. pp. 3966-3971.
- Wang,W., Engelaar, R., Chen, X., Chase, J., 2009. The state-of-art of underwater vehicles - theories and applications. *Mobile Robots - State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions*, X.Q. Chen, Y.Q. Chen and J.G. Chase (Ed.), InTech.
- Yime, E., 2008. Modelo matemático y control vectorial de robots submarinos de geometría variable. Ph.D. thesis, Univesidad Politecnica de Madrid, Madrid, España.
- Yoerger, D., Cooke, J., J., S., 1990. The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 15 (3), 167–178.
- Yoerger, D., Slotine, J., 1985. Robust trajectory control of underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 10 (4), 462–470.
- Yoshida, Hiroshi. (2008). Underwater vehicles. Chap. Fundamentals of underwater vehicle hardware and their applications, pp. 557-582. I-Tech. Viena, Austria
- Yuh, J., 1990. A neural net controller for underwater robotic vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 15 (3), 161–166.
- Yuh, J., 1994. Learning control of underwater robotic vehicles. *IEEE Control System* 14 (2), 39–46.
- Yuh, J., January 2000. Design and control of autonomous underwater robots: A survey. *Auton. Robots* 8 (1), 7–24.
- Yuh, J., Nie, J., Lee, C., 1999. Experimental study on adaptive control of underwater robots. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. pp. 393–398.
- Zhang, Y., Tian, J., Su, D., Wang, S., 2006. Research on the hierarchical supervisory control of underwater glider. In: *Proceedigs of IROS 2006*. pp. 5509–5513.

Modelado de un vehículo autónomo subacuático

Mabel Bottoni

Alejandro Molina

Germán Fernández Madarieta

1. Introducción

Un vehículo autónomo submarino es un dispositivo con un sistema de propulsión y un sistema de control que le permiten desplazarse a través del agua en tres dimensiones, con la capacidad de seguir trayectorias pre-programadas. En su gran mayoría estos vehículos están equipados con sensores a bordo, lo cual hace posible la medición de diferentes parámetros oceánicos referenciándolos tanto espacial como temporalmente. Pueden ser programados para navegar a una presión o profundidad constante o variar su profundidad según en forma autónoma. Disponen de una alta capacidad de toma de datos con muestreos de alta frecuencia, lo que los hace altamente productivos.

Una de las grandes ventajas que presentan estos los vehículos submarinos es su autonomía, ya que contienen su propia fuente de energía generalmente basada en baterías recargables, que les permite trabajar en forma continua. Al no requerirse una línea de comunicación entre el vehículo y la superficie se logra minimizar los problemas de comunicación, de gran importancia en el medio acuático. Estas propiedades los hacen útiles en tareas de exploración científica, muestreo oceanográfico, y exploración submarina siendo en muchos casos la mejor opción para algunas tareas, al no sufrir las limitaciones impuestas por los cables, como en el caso de los robots submarinos.

La obtención del modelo dinámico de un vehículo autónomo submarino permite diseñar e implementar estrategias de control y sistemas de navegación, que posibiliten la realización, de distintas misiones programadas, de manera autónoma. Para la modelación dinámica de estos vehículos se requiere la determinación de coeficientes que permitan expresar las relaciones lineales y no lineales de las fuerzas y momentos que actúan sobre el vehículo.

Si bien, los métodos analíticos y semi-empíricos que se utilizan para obtener modelos basados en principios físicos, hacen posible la determinación de la

gran mayoría de los parámetros del modelo, no todos los coeficientes pueden determinarse por vía analítica. Es por ello que estos métodos necesitan combinarse con otras técnicas, para poder encontrar los valores numéricos de algunos de esos parámetros.

2. Cinemática de un vehículo submarino autónomo

Un análisis matemático basado en el comportamiento estático y dinámico de un vehículo autónomo subacuático AUV (por las siglas en inglés de *Autonomous Underwater Vehicle*), permite simular y controlar el comportamiento de estos vehículos marinos dentro del agua.

En el siguiente estudio, se considera al móvil en estudio como un sólido rígido, esta suposición permite no tener en cuenta, las fuerzas que actúan de manera específica, entre los elementos de masa del vehículo, para el análisis dinámico del mismo.

Para obtener las ecuaciones que rigen el movimiento de un cuerpo rígido es necesario definir un sistema de referencia inercial. En este caso se toma como referencia de sistema inercial a la Tierra asumiendo, que la aceleración de un punto sobre la superficie terrestre, debida a la rotación de la misma, puede ser despreciada para el caso de estos vehículos subacuáticos. Esta aproximación es válida, en esta situación, ya que el movimiento de la Tierra afecta poco a los vehículos marinos que se desplazan a baja velocidad, como es el caso de los AUV) [1]. Según estas consideraciones se define, el sistema de referencia inercial con origen en un punto OT solidario a la Tierra, donde el eje X apunta hacia el norte, el eje Y hacia el este y el eje Z hacia el centro de la Tierra.

Si se considera a un AUV como un sólido rígido con seis grados de libertad 6(GDL), donde estos seis grados de libertad están determinados por los desplazamientos y rotaciones independientes del vehículo [3], serán necesarias tres coordenadas para determinar su posición y tres para conocer su orientación. De esta forma las tres primeras coordenadas describen la posición y el movimiento lineal del vehículo, y las otras tres coordenadas permiten determinar la orientación y el movimiento rotatorio, del mismo.

Normalmente en los vehículos submarinos las velocidades lineales y angulares están asociadas a un sistema de coordenadas móvil situado en el vehículo y sus derivadas temporales se miden con respecto al marco de referencia del cuerpo. De esta forma es útil definir un sistema de coordenadas solidario al AUV, con origen en un punto perteneciente al vehículo. Se define así, el sistema de coordenadas $A = [\vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A]$ solidario al AUV, con origen en su centro de masa (OA), donde los ejes x_A , y_A y z_A se hacen coincidir con los ejes de inercia del AUV, lo cual facilita el análisis dinámico. El eje \vec{x}_A se toma coincidente con la dirección de avance del AUV, \vec{y}_A es ortogonal a \vec{x}_A y es positivo hacia estribor en el plano horizontal, mientras que \vec{z}_A está orientado

en sentido descendente y ortogonal al plano $\vec{x}_A\vec{y}_A$, como se muestra en la *Figura 1*.

Para el estudio de la posición, velocidad y aceleración del vehículo resulta así necesario convertir los parámetros de estado en términos del sistema de referencia del AUV a parámetros del sistema de referencia inercial. En particular, convertir la velocidad lineal y la velocidad angular del sistema de referencia del vehículo al sistema inercial tomado como referencia externa.

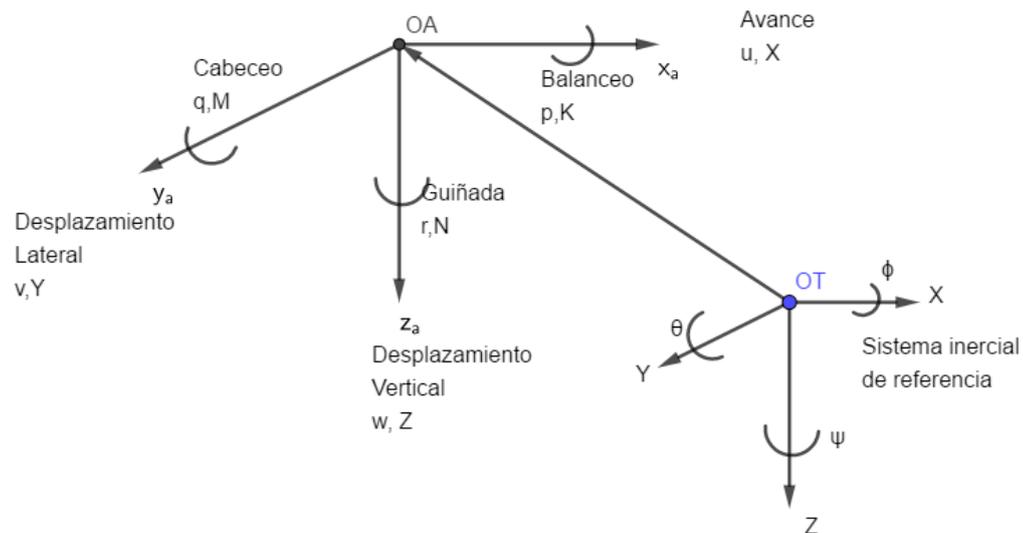


Figura 1

2.1. Ecuaciones cinemáticas

Las ecuaciones cinemáticas se pueden expresar en forma vectorial utilizando la representación vectorial que propone Fossen [1] y Antonelli [2] entre otros, para el planteamiento de las ecuaciones lineales y no lineales, que describen la dinámica del AUV.

Las seis componentes de posición y actitud del AUV, que describen el movimiento de un vehículo marino en los seis grados de libertad 6 *GDL*, referidas al marco inercial, son:

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$$

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

con $\eta_1 = [x, y, z]^T$ y $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$

Donde η es el vector de posición y orientación con coordenadas en el sistema de referencia inercial.

El vector η_1 permite determinar la posición del vehículo con respecto al sistema fijo a tierra y η_2 determina su orientación con respecto al mismo, dada por los ángulos de *Euler* (φ, θ, ψ). [3]

Los movimientos del AUV referidos al marco fijo al cuerpo del vehículo, quedan así definidos mediante las seis componentes de velocidad, según se indica en la Figura1:

$$\boldsymbol{v} = [u, v, w, p, q, r]^T$$

Siendo, respectivamente:

- u avance (surge),
- v desplazamiento lateral (sway),
- w desplazamiento vertical (heave),
- p alabeo (roll),
- q cabeceo (pitch), y
- r guiñada (yaw).

Luego, la velocidad del AUV, en coordenadas del marco de referencia del cuerpo, se puede representar como:

$$\boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

donde:

$$\boldsymbol{v}_1 = [u \quad v \quad w]^T,$$

\boldsymbol{v}_1 es la velocidad lineal del vehículo, medido en coordenadas del marco del cuerpo, y

$$\boldsymbol{v}_2 = [p \quad q \quad r]^T$$

\boldsymbol{v}_2 representa la velocidad angular del AUV, medido en el marco de referencia solidario al vehículo.

En adelante se utilizará la notación $\boldsymbol{\omega}$ para el vector \boldsymbol{v}_2 , de tal forma que:

$$\omega = [p \quad q \quad r]^T.$$

Se puede resumir en la Tabla1, la notación utilizada para cada variable según SNAME (1950) [6].

GDL		Fuerzas y Momentos	Velocidad lineal y angular	Posición y ángulo de Euler
1	Movimiento en dirección eje x (avance)	X	u	x
2	Movimiento en dirección eje y (desplazamiento lateral)	Y	v	y
3	Movimiento en dirección eje z (desplazamiento vertical)	Z	w	z
4	Rotación en eje axial x (alabeo)	K	p	ϕ
5	Rotación en eje axial y (cabeceo)	M	q	θ
6	Rotación en eje axial z (guiñada)	N	r	ψ

Tabla 1: Notación utilizada para cada variable según SNAME (1950)

Estas componentes son relativas a un sistema de coordenadas moviéndose con la corriente del líquido donde se encuentra sumergido el vehículo. Si se considera v , como la velocidad relativa de los ejes solidarios al vehículo respecto al flujo en el que se mueve, y puede suponerse que los ejes se desplazan a una velocidad v_c debido a la corriente, con estas consideraciones se podría expresar la velocidad del AUV con respecto a los ejes inerciales, como:

$$\dot{\eta} = d(\eta) / d(t)$$

$$\text{con } \dot{\eta} = J\eta(v + v_c) \quad (3)$$

donde, $J\eta$ es la matriz de rotación entre ambos ejes [1].

2.2. Matriz de Rotación

Para el estudio de la posición, velocidad y aceleración del vehículo en ambos marcos de referencia se recurre a la transformación de los ángulos de Euler: roll (ϕ), pitch (θ), yaw (ψ) [5]. Euler estableció que dos marcos coordenados ortonormales independientes (con un origen común) pueden ser relacionados por una sucesión de no más de tres rotaciones alrededor de los ejes coordenados. Esto significa que si se conoce la secuencia de ejes a rotar, se necesitan solo tres ángulos de Euler para definir completamente la rotación total. Usando el teorema de Euler es posible ver una secuencia de rotaciones sobre distintos ejes como una sola rotación alrededor de un eje ya que cada

rotación, al tener asociada una matriz, hace que la secuencia de ellas tenga, a su vez, asociada una sola matriz.

Estas matrices describen la orientación mutua entre los dos sistemas coordenados y sus vectores columna son los cosenos directores de los ejes de un sistema coordenado con respecto a otro. Utilizando esta propiedad para los tres ángulos de Euler ϕ , θ , y ψ , que permiten determinar la orientación del vehículo con respecto al marco inercial y realizando esta secuencia de rotaciones para cada plano que determina cada par de ejes ortogonales, se obtienen las matrices fundamentales de rotación. [3]:

$$R(x, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\phi & -S_\phi \\ 0 & S_\phi & C_\phi \end{bmatrix}$$

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix}$$

$$R(z, \psi) = \begin{bmatrix} C_\psi & -S_\psi & 0 \\ S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $S_x = \sin(x)$ y $C_x = \cos(x)$.

La matriz que representa estas rotaciones es matemáticamente equivalente a:

$$R(\phi, \theta, \psi) = R(x, \phi) R(y, \theta) R(z, \psi)$$

Ahora bien, la matriz de rotación $R(\phi, \theta, \psi)$ es una matriz ortogonal, por lo tanto $R^{-1} = R^T$, lo cual implica que el mismo resultado se obtiene de transformar un vector del marco de referencia fijo al cuerpo al marco inercial, invirtiendo el orden de rotación. Lo cual es matemáticamente equivalente a realizar el siguiente producto:

$$R = R_z, \psi R_y, \theta R_x, \phi$$

Se expresa así la siguiente matriz de transformación R , que permite relacionar el vector de velocidad lineal en un marco de referencia inercial al marco de referencia del cuerpo, como:

$$R = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

La matriz de rotación de la estructura inercial con respecto al sistema de referencia móvil ubicado en el cuerpo, puede expresarse como:

$$R^T = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & S_\psi C_\theta & -S_\theta \\ C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & C_\theta S_\phi \\ C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

Una vez conocida la matriz de rotación se pueden establecer las ecuaciones cinemáticas de rotación, que permitan determinar las relaciones entre las velocidades angulares del AUV expresadas en ambos ejes de referencia.

Relacionando, la derivada de la matriz ortonormal y su propiedad de ortonormalidad, el vector velocidad angular, respecto a los ejes de coordenadas del cuerpo, se relaciona con las velocidades generalizadas $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$, en donde los ángulos de Euler son válidos), utilizando la matriz de transformación W_η :

$$W_\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -S_\theta \\ 0 & C_\phi & C_\theta S_\phi \\ 0 & -S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

La matriz W_η se puede invertir siempre que $\theta \neq (2k-1)\pi/2$, ($k \in \mathbb{Z}$), si bien esta matriz no está definida para estos valores del ángulo de cabeceo θ , se utilizará su inversa ya que durante maniobras con vehículo autónomo subacuático no se alcanzan estos valores de ángulo de cabeceo. Luego se puede expresar W_η^{-1} , con donde $T_x = \tan(x)$, como:

$$W_\eta^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & S_\phi T_\theta & C_\phi T_\theta \\ 0 & C_\phi & -S_\phi \\ 0 & S_\phi / C_\theta & C_\phi / C_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

Así la matriz de transformación para velocidades angulares del marco inercial al del cuerpo es W_η y del marco del cuerpo al inerciales W_η^{-1} . Asignando: $J_1(\eta) = R$ y $J_2(\eta) = W_\eta^{-1}$, se puede expresar $J(\eta)$ como se indica en la ecuación (8) y (9).

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0 \\ 0 & J_2(\eta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & 0 & 0 & 0 \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & 0 & 0 & 0 \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & S_\phi t_\theta & C_\phi t_\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_\phi & -S_\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S_\phi}{c_\theta} & \frac{C_\phi}{c_\theta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3. Velocidad lineal del AUV

Recordando que las coordenadas del centro de masa del vehículo respecto del sistema de referencia inercial están dadas por el vector η_1 , tal que:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad \text{con } \eta_1 = [x, y, z]^T \quad \text{y } \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$$

La derivada temporal de η_1 , es la velocidad del centro de masa del vehículo (origen del sistema de referencia móvil) expresada respecto del eje de referencia inercial.

Siendo \mathbf{v}_1 la velocidad del centro de masa del vehículo OA (origen del sistema de coordenadas móvil) respecto del origen del sistema de referencia inercial, expresada respecto del eje de referencia móvil, la conversión entre $\dot{\eta}_1$ y \mathbf{v}_1 puede establecerse mediante la matriz de transformación $J_1(\eta)$, de forma que la velocidad lineal del vehículo medida en coordenadas del marco inercial, se puede expresarse como:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta) \mathbf{v}_1 \quad (10)$$

con $\mathbf{v}_1 = [\mathbf{u} \ \mathbf{v} \ \mathbf{w}]^T$ (velocidad lineal del vehículo en coordenadas del marco del cuerpo).

Luego, con $J_1(\eta) = R$, reemplazando en la ecuación (10), por la matriz de rotación R calculada en la ecuación (4), se obtienen las componentes de la velocidad del AUV en coordenadas inerciales, como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & c(\psi)s(\phi)s(\theta) - c(\phi)s(\psi) & s(\phi)s(\psi) + c(\phi)c(\psi)s(\theta) \\ c(\theta)s(\psi) & c(\phi)c(\psi) + s(\phi)s(\psi)s(\theta) & c(\phi)s(\psi)s(\theta) - c(\psi)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.4. Velocidad angular del AUV

La derivada temporal de η_2 , siendo $\eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T$, determina la velocidad angular del centro de masa del AUV, respecto del sistema inercial, expresada respecto del eje de referencia fijo.

Recordando, que las velocidades angulares del sistema de referencia móvil respecto del sistema inercial, referido al sistema de referencia móvil, están dadas por $w = [p \ q \ r]^T$, y que la relación entre el sistema de referencia inercial y el móvil se establece a través de la transformación $J_2(\eta)$, con $J_2(\eta) = W\eta^{-1}$, y haciendo uso de la ecuación (7), se puede expresar la variación en el tiempo de los ángulos ϕ , θ , y ψ como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_\phi T_\theta & C_\phi T_\theta \\ 0 & C_\phi & -S_\phi \\ 0 & S_\phi / C_\theta & C_\phi / C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (12)$$

Debido a que es una función discontinua este resultado será válido para cualquier ángulo θ , tal que: $\theta \neq (2k-1)\pi/2$, ($k \in \mathbb{Z}$).

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= p + q \operatorname{sen} \phi \tan \theta + r \operatorname{cos} \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \operatorname{cos} \phi - r \operatorname{sen} \phi \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{\psi} = q \operatorname{sen} \phi \operatorname{sec} \theta + r \operatorname{cos} \phi \operatorname{sec} \theta$$

Las derivadas $(\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ son distintas de las velocidades angulares del AUV en el sistema de coordenadas del cuerpo rígido (p, q, r).

Para obtener la relación entre las velocidades angulares en el sistema de ejes solidarios al cuerpo, con la variación en el tiempo de los ángulos de ϕ , θ y ψ , se invierte la matriz anterior dada en la ecuación (12), de forma que el movimiento rotacional del AUV queda definido por las componentes de las velocidades angulares en los tres ejes: velocidad angular de balanceo (p), velocidad angular de cabeceo (q), y velocidad angular de guiñada (r), sobre los ejes x_A , y_A y z_A respectivamente como:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -S_\theta \\ 0 & C_\phi & C_\theta S_\phi \\ 0 & -S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Nótese que para ángulos pequeños p , q , r son aproximadamente iguales a $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$ lo cual se observa si se solucionan las ecuaciones anteriores para ángulos pequeños.

Así las matrices resultantes se pueden expresar como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [J(\eta)] \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (15)$$

Expresando $J(\eta)$, según la ecuación (9), como:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & 0 & 0 & 0 \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & 0 & 0 & 0 \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & S_\phi t_\theta & C_\phi t_\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_\phi & -S_\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{S_\phi}{C_\theta} & \frac{C_\phi}{C_\theta} \end{bmatrix}$$

Resumiendo, se puede expresar las velocidades del AUV con respecto a los ejes inerciales, como:

$$\dot{x} = u[c(\psi)c(\theta)] - v[c(\phi)s(\psi) - c(\psi)s(\phi)s(\theta)] + w[s(\phi)s(\psi) + c(\phi)c(\psi)s(\theta)]$$

$$\dot{y} = u[c(\theta)s(\psi)] + v[c(\phi)c(\psi) + s(\phi)s(\psi)s(\theta)] - w[s(\phi)c(\psi) - c(\phi)s(\psi)s(\theta)]$$

$$\dot{z} = -u[s(\theta)] + v[c(\theta)s(\phi)] + w[c(\phi)c(\theta)]$$

$$\dot{\phi} = p + q \operatorname{sen} \phi \tan \theta + r \operatorname{cos} \phi \tan \theta$$

$$\dot{\theta} = q \operatorname{cos} \phi - r \operatorname{sen} \phi$$

$$\dot{\psi} = q \operatorname{sen} \phi \sec \theta + r \operatorname{cos} \phi \sec \theta$$

Lo cual también nos permite expresar las velocidades lineales y angulares en los tres ejes:

$$\begin{aligned}
u &= \dot{x}[c(\psi)c(\theta)] + \dot{y}[c(\phi)s(\psi)] - \dot{z}[s(\theta)] \\
v &= \dot{x} - c(\phi)s(\psi) + \dot{y} [c(\psi)c(\phi) + s(\psi)s(\phi)s(\theta)]\dot{z}[s(\phi)c(\theta)] \\
w &= \dot{x}[s(\psi)s(\phi) + c(\psi)c(\phi)s(\theta)] + \dot{y} \\
p &= \dot{\phi} - \dot{\psi}[s(\theta)] \\
q &= \dot{\theta}[c(\phi)] + \dot{\psi}[c(\theta)s(\phi)] \\
r &= -\dot{\theta}[s(\phi)] + \dot{\psi}[c(\phi)c(\theta)]
\end{aligned}$$

En el caso de disponer del dato de la velocidad de la corriente con respecto al sistema fijo al AUV, puede expresarse la velocidad de la corriente con respecto a tierra, según la ecuación (3), como:

$$\mathbf{v}_c = J(\boldsymbol{\eta})^{-1} (\boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}}_c$$

3. Dinámica de Vehículos Submarinos

El modelo dinámico de un AUV describe la relación existente entre los movimientos del vehículo y las fuerzas que se ejercen sobre el mismo. De esta manera, se pueden calcular las fuerzas externas necesarias para que el vehículo se mueva de una forma determinada, o por el contrario, determinar el movimiento generado por las fuerzas externas a las que el AUV está sujeto.

Para obtener las ecuaciones de movimiento se asume, que el vehículo es un cuerpo rígido y que el sistema de referencia fijo a Tierra es inercial. La primera de esta suposición permite no tener en cuenta, para este análisis, las fuerzas que actúan de manera específica entre los elementos de masa, mientras que la segunda elimina las fuerzas causadas por el movimiento relativo de la Tierra en el espacio [4].

Las fuerzas y momentos a los que se ve sometido el AUV considerando a éste como cuerpo rígido, serán denominados como:

- X, fuerzas según el eje x
- Y, fuerzas según el eje y
- Z, fuerzas según el eje z
- K, Momentos en el eje x
- M, Momentos en el eje y
- N, Momentos en el eje z

3.1. Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones que representan el movimiento de un cuerpo en un espacio tridimensional se pueden obtener a partir de las leyes de conservación de los momentos lineales y angulares del móvil referidos a un sistema de referencia inercial.

Analizando la cantidad de movimiento del móvil se tiene por el Teorema de la cantidad de movimiento [7] que:

$$\sum \vec{F} = \frac{d(\vec{G})}{dt}, \quad (16)$$

con \vec{G} cantidad de movimiento del sistema, $\vec{G} = \sum m_i \vec{v}_i$.

Considerando la masa del AUV constante la sumatoria de fuerzas se expresa como:

$$\sum \vec{F} = m \frac{d(\vec{v})}{dt} \quad (17)$$

donde $\sum \vec{F}$ es la sumatoria de fuerzas exteriores sobre el sistema aplicada en el centro de masas del cuerpo. La derivada se realiza respecto de un sistema de ejes inerciales. Es una derivada absoluta. El vector velocidad también es un vector absoluto, que podrá estar proyectado en el sistema de referencia que se desee ya sea absoluto o relativo.

El momento resultante $\sum \vec{M}_c$ respecto al centro de masa del cuerpo rígido de todas las fuerzas que se ejercen sobre él (Teorema del momento cinético) [7] es:

$$\vec{M}_c = \frac{d(\vec{H})}{dt} \quad (18)$$

$$\vec{H} = I_c \vec{\omega} \text{ con } \vec{\omega} = [p, q, r]^T$$

Donde, \vec{M}_c es el momento de las fuerzas alrededor del centro de masa, \vec{H} es el momento cinético respecto de dicho centro de masa, su derivada también es absoluta, y I_c es la matriz de inercia del vehículo.

La matriz de inercia $I_c \in R^{3 \times 3}$ para un cuerpo rígido con respecto a su centro de masa queda definida como:

$$I_C = \begin{bmatrix} I_x & -I_{yx} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad I_C = I_C^T > 0$$

(19)

donde I_x , I_y , e I_z son los momentos de inercia con respecto a los ejes solidarios al cuerpo y los productos de inercia $I_{xy} = I_{yx}$, $I_{xz} = I_{zx}$, $I_{yz} = I_{zy}$, están definidos como:

$$I_x = \int_V (y^2 + z^2) \rho_m dV;$$

$$I_y = \int_V (x^2 + z^2) \rho_m dV;$$

$$I_z = \int_V (x^2 + y^2) \rho_m dV;$$

$$I_{xy} = \int_V xy \rho_m dV = \int_V xy \rho_m dV = I_{yx}$$

$$I_{xz} = \int_V xz \rho_m dV = \int_V zx \rho_m dV = I_{zx}$$

$$I_{yz} = \int_V yz \rho_m dV = \int_V zy \rho_m dV = I_{zy}$$

Para establecer las ecuaciones de movimiento del cuerpo rígido, se define el vector posición, del centro de masa (OA) del cuerpo, con respecto a los ejes fijos a tierra, considerados inerciales, como $\vec{r}_{G/OT}$, según la *Figura 2*.

$$\vec{r}_{G/OT} = \vec{r}_{OA/OT} + \vec{r}_{G/OA} \quad (20)$$

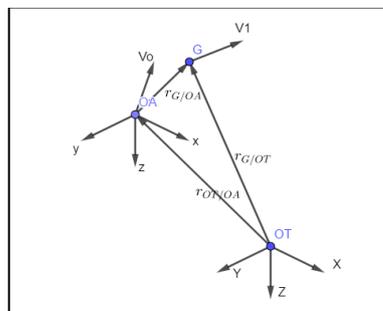


Figura 2

Derivando la ecuación (20) con respecto al tiempo se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \vec{r}_{G/OT} = \dot{\vec{r}}_{OA/OT} + \left(\frac{d}{dt} \vec{r}_{G/OA} + \vec{\omega} \wedge \vec{r}_{G/OA} \right), \text{ con } \frac{d}{dt} \vec{r}_{G/OA} = 0$$

$$\vec{v}_{G/OT} = \vec{v}_{OA/OT} + \vec{\omega} \wedge \vec{r}_{G/OA}$$

Luego de $\sum \vec{F} = m \frac{d(\vec{v})}{d(t)}$

$$F_G = m(\dot{\vec{v}}_{G/OT} + \vec{\omega} \wedge \vec{v}_{G/OA})$$

$$F_G = m[\dot{v}_{G/OA} + S(\omega)v_{G/OT}] \quad (21)$$

$$\text{con } S(\omega)v_{G/OT} = \omega \wedge v_{G/OT}$$

Si se analiza la rotación del vehículo y los momentos a los que está sometido haciendo uso del teorema del momento cinético, se observa que el momento resultante $\sum \vec{M}_G$ respecto al centro de masa (OA) del vehículo, de todas las fuerzas que se ejercen sobre él, es:

$$\vec{M}_G = \frac{d(\vec{H})}{d(t)} = \frac{d}{dt} (I_G \vec{\omega})$$

$$\frac{d}{dt} (I_G \vec{\omega}) + \vec{\omega} \wedge (I_G \vec{\omega})$$

$$(I_G \dot{\vec{\omega}}) - (I_G \vec{\omega}) \wedge \vec{\omega}$$

Lo cual se puede expresar, con $S(I_G \omega)\omega = (I_G \omega) \wedge \omega$ como:

$$I_G \dot{\omega} - S(I_G \omega)\omega = M_G \quad (22)$$

Las ecuaciones de Newton- Euler pueden escribirse en forma matricial como:

$$M_{RA} \begin{bmatrix} \dot{v}_{G/OT} \\ \dot{w}_b \end{bmatrix} + C_{RA} \begin{bmatrix} v_{G/OT} \\ w_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_G \\ M_G \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} mI_{3*3} & 0_{3*3} \\ 0_{3*3} & I_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{G/OT} \\ \dot{w}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} mS w_b & 0_{3*3} \\ 0_{3*3} & -S(I_G w_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{G/OT} \\ \dot{w}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_G \\ M_G \end{bmatrix}$$

La matriz de inercia M_{RA} se expresa en la siguiente forma:

$$M_{RA} = \begin{bmatrix} mI_{3x3} & -mS(r_G) \\ mS(r_G) & I_G \end{bmatrix} \quad (23)$$

donde m es la masa del AUV, I_G la matriz de inercia del vehículo, I_{3x3} los momentos de inercia respecto a los ejes principales de inercia, $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ el vector que determina la ubicación del origen (OA) con respecto al centro de gravedad del vehículo y $S(\lambda)$ es la matriz simétrica, tal que:

$$S(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad S(\lambda) = -S^T(\lambda) \quad (24)$$

Con lo cual la matriz de masa M_{RA} queda determinada por:

$$M_{RA} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (25)$$

Luego la matriz de Coriolis de cuerpo rígido (C_{RA}), se podrá expresar como:

$$C_{RA} = \begin{bmatrix} 0_{3*3} & -mS(v) \\ -mS(v) & -S(Iw) \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C_{RA}(v) = \begin{bmatrix} 0_3 & -S(M_{R11}v_1 + M_{R12}v_2) \\ -S(M_{R11}v_1 + M_{R12}v_2) & -S(M_{R21}v_1 + M_{R22}v_2) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$C_{RA}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & m(v - z_G p) & -mu - mz_G q & m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & -mv + mz_G p & 0 & -I_{yz}q_{xz} - I_{xz}p + I_{zz}r & yp + I_{yz}r - I_{yy}q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & mu + mz_G q & I_{yz}q + I_{xz}p - I_{zz}r & 0 & -I_{xy}q + I_{xx}p - I_{xz}r \\ m(x_G r + v) & -m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{yz}r - I_{xy}p - I_{yy}q & I_{xy}q - I_{xx}p + I_{xz}r & 0 \end{bmatrix}$$

(28)

Por último, se obtienen las ecuaciones de movimiento de un cuerpo rígido moviéndose en el espacio con respecto a un sistema de ejes inerciales, como:

$$X = m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})]$$

$$Y = m[\dot{v} - wp + ur - y_g(p^2 + r^2) + z_g(rq - \dot{p}) + x_g(p + \dot{r})]$$

$$Z = m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(pr - \dot{q}) + y_g(qr + \dot{p})]$$

$$K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]$$

$$M = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr - (\dot{p} + rq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (pq - \dot{r})I_{yz} + m[z_g(\dot{u} - vr + wp) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})qp - (\dot{q} + pr)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (qr - \dot{p})I_{zx} + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)]$$

Generalizando estas ecuaciones para un punto O de ejes solidarios al cuerpo que no coincida con el centro de masa del cuerpo rígido y realizando los cálculos correspondientes, las ecuaciones de movimiento pueden escribirse en forma matricial como se expresa en la ecuación (29):

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ M_0 \end{bmatrix} = M_R \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{w}_b \end{bmatrix} + C_R(v_0, w_b) \begin{bmatrix} v_0 \\ w_b \end{bmatrix} \quad (29)$$

3.2. Movimiento general de un AUV

A continuación, se presentan, desde un enfoque Lagrangiano, las ecuaciones de movimiento para cuerpos sumergidos en el agua. El movimiento de un AUV es el resultado de la acción de las fuerzas actuantes sobre el mismo en un medio fluido viscoso. Estas fuerzas son principalmente las fuerzas inerciales, las hidrodinámicas y las fuerzas de restitución.

3.2.1 Ecuaciones de Euler-Lagrange.

La descripción de la dinámica del vehículo con seis grados de libertad se desarrolla comúnmente desde un enfoque Lagrangiano. Por lo tanto, se consideran la energía cinética y la energía potencial, denominadas T y V respectivamente, para la deducción de las ecuaciones de movimiento del AUV, respecto al sistema inercial. La aplicación de la mecánica de Lagrange da lugar a n ecuaciones diferenciales correspondientes a n coordenadas generalizadas.

El Lagrangiano L es la suma de las energías cinéticas traslacional E_{trans} y la energía rotacional E_{rot} menos la energía potencial E_{pot} :

$$L = T - V \quad (30)$$

$$L(\eta, \dot{\eta}) = E_{trans} + E_{rot} - V \quad (31)$$

$$\text{con } T = E_{trans} + E_{rot}$$

Las ecuaciones que representan el movimiento del vehículo en un espacio tridimensional pueden obtenerse a partir de las leyes de conservación de los momentos lineales y angulares referidos a un sistema de referencia inercial como se desarrolló con anterioridad [4].

La segunda ley de Newton puede expresarse utilizando el Lagrangiano, para cualquier sistema de coordenadas fijo al cuerpo como:

$$\mathbf{M}_{RA}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RA}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{M}_A\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_A\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_{RA} \quad (32)$$

Donde, M_{RA} es la matriz de inercia determinada a partir de la configuración de simetría del AUV, considerando su estructura similar a un elipsoide alargado con distribución de masa uniforme, C_{RA} representa la matriz de Coriolis, M_A es la matriz de inercia de la masa añadida, C_A es la matriz de Coriolis incluyendo la masa añadida, $D(v)$ la matriz de amortiguamiento y el vector $g(\eta)$ representa las fuerzas de restitución, compuestas por la fuerza de gravedad y la fuerza de flotación.

Con $\tau_{RA} = \tau_{dh} + \tau_m + \tau_p$; donde τ_{dh} y τ_{sh} son los momentos generados por las fuerzas hidrodinámicas, τ_m los momentos generados por los efectos de viento y oleaje y τ_p los torques producidos por los propulsores o cualquier otra fuerza ejercida sobre el AUV.

El vector velocidad v es la velocidad generalizada $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ donde u, v, w son las componentes lineales de avance, balanceo, alabeo y p, q, r son las componentes angulares de roll, pitch y yaw. Los momentos generalizados $\tau_i = [X_i, Y_i, Z_i, K_i, M_i, N_i]^T i = (hd, m, p)$

Se observa que la ecuación (32) puede obtenerse aplicando la ecuación Lagrangiana:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \eta} = \tau_{RA}$$

con $L = T - V$ y $T = T_{RA} + T_A = \frac{1}{2} \dot{\eta}^T M(\eta) \dot{\eta}$

siendo $M = M_{RA} + M_A$ (la matriz de inercia incluida la matriz de masa añadida)

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = \frac{1}{2} \dot{\eta}^T \frac{\partial M(\eta)}{\partial \eta} \dot{\eta}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \eta} = g(\eta)$$

El vector $g(\eta)$ representa las fuerzas de restitución (compuestas por la fuerza de gravedad y la fuerza de flotación).

Luego:

$$\frac{\partial L}{\partial \eta} = \frac{\partial T}{\partial \eta} - \frac{\partial V}{\partial \eta} = \frac{1}{2} \dot{\eta}^T \frac{\partial M(\eta)}{\partial \eta} \dot{\eta} - g(\eta)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}} = M(\eta) \dot{\eta} - \frac{\partial V}{\partial \dot{\eta}} = M(\eta) \dot{\eta}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}} \right) = M(\eta) \ddot{\eta} + \dot{M}(\eta) \dot{\eta}$$

$$\dot{M}(\eta) = \dot{\eta}^T \frac{\partial M(\eta)}{\partial \eta}$$

Remplazando $M(\eta) \ddot{\eta} + \frac{1}{2} \dot{M}(\eta) \dot{\eta} + g(\eta) = \tau_{RA}$ (33)

Analizando los momentos de las distintas fuerzas actuantes sobre el AUV detallados en la ecuación:

$$\tau_{RA} = \tau_{dh} + \tau_m + \tau_p$$

Se denomina τ_{dh} a los momentos hidrodinámicos, generados por las fuerzas de arrastre que se oponen al movimiento y actúan en dirección opuesta al movimiento del AUV, generando la matriz de arrastre generalizada $D(v)$, así se puede considerar la energía disipada en este caso como:

$$\frac{\partial D_d}{\partial \dot{\eta}} = D(v, \eta) \dot{\eta} \quad (34)$$

Reemplazando la ecuación (34) en la ecuación (33), se obtiene:

$$M(\eta) \ddot{\eta} + \frac{1}{2} \dot{M}(\eta) \dot{\eta} + D(v, \eta) \dot{\eta} + g(\eta) = \tau \quad (35)$$

Donde $\tau = [\tau_X, \tau_Y, \tau_Z, \tau_K, \tau_M, \tau_N]^T$, es el vector de entrada que representa las fuerzas que ejercen los impulsores (o cualquier otro elemento generador de fuerza) sobre el AUV.

Se observa que el término $\frac{1}{2} \dot{M}(\eta)$ representa la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis del cuerpo rígido sumergido y de la masa añadida

$$C(v, \eta) = \frac{1}{2} \dot{M}(\eta) \quad (36)$$

Así el modelo dinámico de un vehículo submarino se puede escribir en su forma compacta como se muestra a continuación:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (37)$$

donde: $M = M_{RA} + M_A$ es la matriz de inercia incluida la masa añadida, y $C(v) = C_{RA} + C_A$, es la matriz de Coriolis, incluyendo la masa añadida.

3.2.2. Matriz de masa añadida

El aumento aparente de la masa y en general de las propiedades de inercia de un cuerpo sumergido en un fluido es lo que se conoce como masa añadida.

Cuando un cuerpo se mueve en un fluido, una cierta cantidad de fluido debe moverse a su alrededor. Cuando el cuerpo acelera, entonces también debe acelerar el fluido. Por lo tanto, se requiere más fuerza para acelerar el cuerpo en un fluido que en el vacío. Ya que la fuerza está en relación con la masa y la aceleración, podemos pensar en la fuerza adicional en términos de un agregado imaginario de masa al objeto en el fluido.

Las masas añadidas son las fuerzas y momentos inducidos por la presión debido al movimiento acelerado del cuerpo. Estas fuerzas y momentos son proporcionales a la aceleración del vehículo [8]. De tal manera que cualquier movimiento del AUV causará un movimiento del fluido estacionario en sentido opuesto. En vehículos completamente sumergidos se suele asumir que los coeficientes de masas añadidas son constantes [1]. En este caso se restringe el análisis a vehículos sumergidos que se desplazan a baja velocidad y se consideran cuerpos con tres planos de simetría, lo que permite no tener en cuenta los elementos de la matriz M_A que están fuera de la diagonal principal [9]. Esto facilita el cálculo de M_A ya que elementos que no forman parte de la diagonal principal son muy dificultosos de calcular, en forma analítica.

Estos coeficientes de masa añadidos se definen como las constantes de proporcionalidad, que relacionan a las aceleraciones lineales y angulares con cada una de las fuerzas y momentos hidrodinámicos que generan. De esta forma, la fuerza hidrodinámica a lo largo del eje x debido a la aceleración en la dirección x se expresa como:

$$X_A = -X_{\dot{u}}\dot{u} \quad \text{donde} \quad X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \quad (38)$$

De manera similar, todos los demás coeficientes de masa añadidos pueden ser definidos para un vehículo cuyas componentes de aceleración son $(\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$. Conformando la matriz de masa añadida como una matriz cuadrada de orden 6:

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Esta matriz se puede expresar en términos de cuatro submatrices:

$$M_A = \begin{bmatrix} M_{A11} & M_{A12} \\ M_{A21} & M_{A22} \end{bmatrix} \quad (40)$$

Finalmente la matriz $M = M_{RA} + M_A$ puede escribirse como:

$$M = \begin{bmatrix} m + X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\dot{p}} & mz_c + X_{\dot{q}} & -my_c + X_{\dot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & m + Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & -mz_c + Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & mx_c + Y_{\dot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & m + Z_{\ddot{w}} & my_c + Z_{\dot{p}} & -mx_c + Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & -mz_c + K_{\ddot{v}} & my_c + K_{\ddot{w}} & I_x + K_{\dot{p}} & -I_{xy} + K_{\dot{q}} & I_{xz} + K_{\dot{r}} \\ mz_c + M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & mx_c + M_{\ddot{w}} & -I_{xy} + M_{\dot{p}} & I_y + M_{\dot{q}} & -I_{yz} + M_{\dot{r}} \\ -my_c + N_{\ddot{u}} & mx_c + N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & -I_{xy} + N_{\dot{p}} & -I_{yx} + N_{\dot{q}} & I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (41)$$

3.2.3. Fuerzas Centrípetas y de Corioli

La matriz de Coriolis, $C(v)$, está compuesta de dos componentes, la matriz de Coriolis y centrípeta del cuerpo rígido, $C_{RA}(v)$, y la matriz de Coriolis de la masa añadida, $C_A(v)$

Esta matriz está dada por la siguiente expresión:

$$C(v) = C_{RA} + C_A(v) \quad (42)$$

La matriz de Coriolis relativa a los efectos hidrodinámicos derivados de la masa añadida al sistema, se calcula a partir de la matriz de masa añadida y del operador $S(\lambda)$. Si se considera la matriz simétrica A_{Sim} , su producto con el vector velocidad, determinan los coeficientes de $S(\lambda)$.

$$A_{Sim} = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (43)$$

Y la matriz de Coriolis de masa añadida:

$$C_A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -S(A_{11}v + A_{12}w) \\ -S(A_{21}v + A_{22}w) & \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

4. El amortiguamiento hidrodinámico.

Los vehículos subacuáticos se ven afectados por el amortiguamiento hidrodinámico, el cual es causado por la fricción lineal y cuadrática debido a la presencia de flujos tipo laminar y turbulento, y por la resistencia de orden cuadrático [10]; [11].

Las fuerzas y momentos relacionados con el amortiguamiento están en función del movimiento relativo del fluido. En las zonas donde habitualmente operan los AUV el flujo es turbulento. En estas condiciones la fricción debido a la fuerza de resistencia al avance provoca efectos lineales y cuadráticos. La resistencia al avance total, se define como la suma de sus componentes lineales y cuadráticos. Por un lado, los términos cuadráticos de la fuerza ascensional o de sustentación (DQ) y por otro lado, los términos lineales de la fuerza de fricción (DL) [4].

Dadas las bajas velocidades del AUV en estudio y la simetría del mismo, se propone una simplificación en los parámetros de la fuerza de amortiguamiento hidrodinámico, que consiste en tomar la diagonal principal de la matriz de términos lineales y la matriz de términos cuadrático.

$$D = D_L + D_Q(v) \quad (46)$$

Donde, D_L es una matriz de 6x6 que agrupa los términos lineales de amortiguamiento y $D_Q(v)$ incluye los coeficientes cuadráticos [9]. Esta fuerza depende de la velocidad del vehículo:

$$D_L = \{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\}, D_Q = \{X_{u|u|}, Y_{v|v|}, Z_{w|w|}, K_{p|p|}, M_{q|q|}, N_{r|r|}\}$$

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u|}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v|}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w|}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p|}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q|}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r|}|r| \end{bmatrix} \quad (47)$$

Los elementos que conforman esta estructura diagonal pueden ser determinados a partir de experimentos [12]; [13], en el caso de determinar los términos lineales y cuadráticos en X

$$X = -\left(\frac{1}{2}\rho C_d A_f\right) u|u| = X_{u|u|}|u| \quad (48)$$

Donde

$$X_{u|u|} = \frac{\partial X}{\partial u|u|} = \frac{-1}{2}\rho C_d A_f \quad (49)$$

Siendo ρ la densidad del agua, C_d el coeficiente de resistencia y A_f el área de la superficie del vehículo que se enfrenta al flujo.

4.1. Términos hidrostáticos

En la hidrodinámica las fuerzas gravitacionales y de flotabilidad se conocen como fuerzas restauradoras [9]. Las fuerzas gravitacionales actúan en el centro de gravedad del vehículo, cuyas coordenadas están definidas por el vector $r_G = [x_G; y_G; z_G]^T$. Por su parte, en el centro de flotabilidad, definido por $r_A = [x_A; y_A; z_A]^T$, actúan las fuerzas de flotabilidad.

El peso de un cuerpo sumergido se puede determinar como:

$$W = mg$$

Donde:

W es el peso del vehículo (N);

m es la masa del vehículo (kg);

g es la constante gravitacional (m/s²).

El empuje o fuerza de flotabilidad se define como:

$$E = \rho g V$$

Con:

E es el empuje que recibe el cuerpo (N)

ρ es la densidad del fluido desplazado (kg/m³)

g es la constante gravitacional (m/s²)

V es el volumen de fluido desplazado (m³)

La distancia entre el (CG) y el (CA), del vehículo se define mediante el vector:

$$r_G = [x_G; y_G; z_G]^T = [x_G - x_A; y_G - y_A; z_G - z_A]^T.$$

Trasladando el peso y el empuje del cuerpo al sistema de referencia móvil (OA):

$$f_W = R^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix}, \quad f_E = -R^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$R^T = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & S_\psi C_\theta & -S_\theta \\ C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & C_\theta S_\phi \\ C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix}$$

Operando sobre las ecuaciones (50) se obtiene:

$$f_W = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & S_\psi C_\theta & -S_\theta \\ C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & C_\theta S_\phi \\ C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix}$$

$$f_W = \begin{bmatrix} -S_\theta W \\ C_\theta S_\phi W \\ C_\theta C_\phi W \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$f_E = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & S_\psi C_\theta & -S_\theta \\ C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi & S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi & C_\theta S_\phi \\ C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi & S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E \end{bmatrix}$$

$$f_E = \begin{bmatrix} -S_\theta E \\ C_\theta S_\phi E \\ C_\theta C_\phi E \end{bmatrix} \quad (52)$$

El vector de fuerzas gravitacionales se expresa en función del sistema de coordenadas (OA) ubicado en el AUV, recordando que se consideró el eje z positivo en dirección a la superficie terrestre, queda expresado como:

$$g(\eta) = - \begin{bmatrix} f_W + f_E \\ r_G \times f_W + r_A \times f_E \end{bmatrix} \quad (53)$$

Donde r_G es el vector que relaciona el centro de gravedad con el eje de referencia móvil y r_A el vector que relaciona el eje de referencia móvil con el inercial.

Reemplazando en la ecuación (53) por las fuerzas obtenidas en las ecuaciones (51) y (52) se obtiene el vector de fuerzas gravitacionales, como:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} S_\theta(W - E) \\ C_\theta S_\phi(E - W) \\ C_\theta C_\phi(E - W) \\ (y_A E - y_G W)C_\theta C_\phi + (z_G W - z_A E)C_\theta S_\phi \\ (-x_A E + x_G W)C_\theta C_\phi + (z_G W - z_A E)S_\theta \\ (x_A E - x_G W)C_\theta S_\phi - (y_G W - y_A E)S_\theta \end{bmatrix} \quad (54)$$

5. Descripción del vehículo experimental

El modelo presentado, es un robot submarino que estructuralmente está diseñado para construirse mediante el uso de una impresora 3D. Los distintos compartimientos estancos que lo conforman permiten el sencillo montaje de los dispositivos y componentes electrónicos, baterías, cámaras, motores, etc. Lo cual facilita su intercambio según las necesidades experimentales.

En la Figura 3 se presenta un diseño en CAD de la estructura interna del AUV.

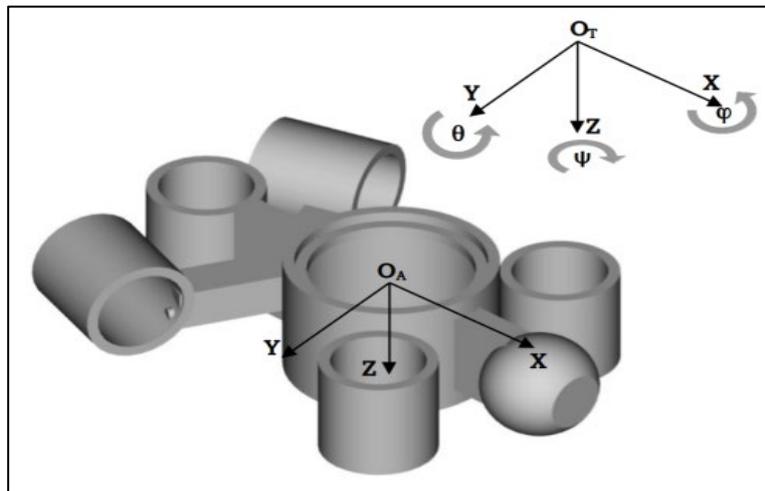


Figura 3

Como se observa en la Figura 3, el mismo dispone de un cilindro vertical estanco donde se disponen los principales componentes. Dispone de cinco motores con sus respectivas toberas ubicadas en la periferia del cilindro y una cámara ubicada en la parte delantera del AUV. Para mejorar el comportamiento hidrodinámico del diseño se propone dotar la estructura de una carcasa semiesférica como se indica en la Figura 4. Sus dimensiones son 48 x 30 x 20 cm con un peso aproximado de 10kgs. Mecánicamente fue diseñado para ser estable.

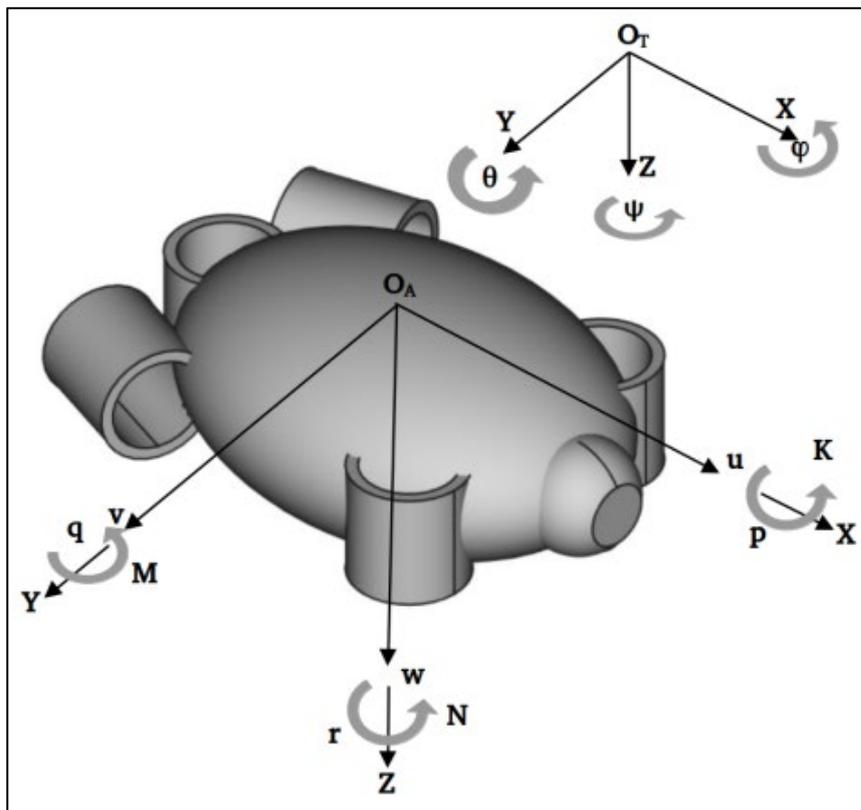


Figura 4

En la Figura 4, se muestra esta misma estructura con su casco correspondiente y se define el sistema inercial de referencia, con origen en el punto O_T , y el sistema de coordenadas solidario al AUV, con origen en un punto perteneciente al vehículo coincidente con su centro de masa (O_A) y $A = [\vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A]$ solidario al AUV, donde los ejes x_A , y_A y z_A se hacen coincidir con los ejes de inercia del AUV. El eje \vec{x}_A se toma coincidente con la dirección de avance del AUV, \vec{y}_A es ortogonal a \vec{x}_A , mientras que \vec{z}_A está orientado en sentido descendente y ortogonal al plano $\vec{x}_A\vec{y}_A$.

5.1. Descripción del movimiento del vehículo.

El vehículo está compuesto por cinco propulsores que producen fuerzas y pares, lo cuales se encuentran dispuestos sobre la estructura central de la siguiente forma, tres en posición vertical, dos al frente y uno atrás, los cuales se aplican para los movimientos de elevación, cabeceo y balanceo y los otros dos en los costados del cilindro, uno del lado derecho y otro del lado izquierdo, para controlar los movimientos de avance, guiñada y balanceo. El ángulo entre la dirección longitudinal y la dirección de la fuerza de los propulsores laterales es de 30°.

Por diseño, el AUV tiene simetría en dos de sus ejes y es estable mecánicamente en ángulo de alabeo, lo que implica que el desplazamiento lateral es pequeño. Dispone de cinco entradas de control, donde f_i es la fuerza de cada propulsor. El efecto de estas fuerzas sobre el vehículo depende de su magnitud y su punto de aplicación.

Según lo desarrollado anteriormente el movimiento del vehículo puede ser definido con las seis componentes de posición y actitud en los seis grados de libertad del AUV, referidas a un marco inercial, según:

$$\begin{aligned} \eta &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T & ; & & \eta_1 = [x, y, z]^T & ; & & \eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T \\ v &= [v_1^T, v_2^T]^T & ; & & v_1 = [u, v, w]^T & ; & & v_2 = [p, q, r]^T \end{aligned} \quad (55)$$

$$\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T & ; & \tau_1 = [X, Y, Z]^T & ; & \tau_2 = [K, M, N]^T$$

Donde η es el vector de posición y orientación con coordenadas en el sistema de referencia inercial, v representa la velocidad lineal y angular en el marco fijo al cuerpo y τ las fuerzas y momentos externos actuando sobre el cuerpo.

El modelo dinámico del AUV, según lo desarrollado con anterioridad en el inciso 3.2, puede ser representado a partir de las siguientes ecuaciones de movimiento de Newton-Euler.

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (56)$$

$$\dot{\eta} = J\eta(v) \quad (57)$$

Donde, M representa la matriz de inercia (incluyendo la masa agregada), $C(v)$ incluye los términos Coriolis y fuerza centrípeta (incluyendo la masa agregada), $D(v)$ describe la matriz de amortiguamiento hidrodinámico, $g(\eta)$ es el vector de la fuerza gravitacional y empuje hidrostático, τ representa el vector de entradas de control y $J\eta$ es la transformación cinemática entre el cuerpo y el marco inercial.

5.1.1. Matriz de inercia

Se realizan algunas simplificaciones sobre la dinámica del AUV, para facilitar el estudio de la dinámica modelo. Se puede suponer que el AUV es simétrico en los tres planos del movimiento, ya que el vehículo funciona a una baja velocidad, utilizando como valor máximo 1m/seg. En el caso del diseño experimental, el AUV es simétrico con respecto al plano x-z y casi simétrico con respecto al x-y. Aunque el AUV no es totalmente simétrico con respecto al plano y-z, debido a su baja velocidad, se supone que el vehículo es simétrico con respecto a este plano, lo cual permite desacoplar los grados de libertad.

Así mismo el vehículo se mantiene casi horizontal en todas las maniobras y se estabiliza, ya que el centro de gravedad y el centro de flotabilidad están correctamente alineados. Los momentos de inercia cruzados I_{xy} ; I_{yx} ; I_{yz} ; I_{zy} son despreciables debido a la simetría del AUV.

Se implementa que el empuje sea ligeramente superior al peso, esto ejerce una fuerza hacia arriba aproximadamente de un 0.4% del peso. Esta semejanza entre las fuerzas se obtiene ya que se ha diseñado el modelo e introducido las masas auxiliares necesarias para que esto se cumpla.

La Tabla 2 presenta los parámetros principales del AUV, considerando la geometría del vehículo, sus propiedades y las principales características de los materiales a utilizar en la construcción.

Propiedades	Valores	Unidades	Símbolos
Dimensiones del AUV	48x24x12	m	$l \times b \times h$
Masa del AUV	10,23	Kg	m
Tensor de Inercia en x	0,052	Kg.m ²	I_{xx}
Tensor de Inercia en y	0,12	Kg.m ²	I_{yy}
Tensor de Inercia en z	0,16	Kg.m ²	I_{zz}

Tabla 2: Parámetros físicos del AUV

Para simplificar el cálculo del tensor de inercia se considera que el centro de inercia coincide con el centro geométrico del cuerpo. Considerando, que el vehículo se moverá a muy baja velocidad, algunos parámetros de amortiguación y masa agregada se pueden estimar utilizando Solidworks.

Con estas consideraciones la matriz M_{RA} obtenida en las ecuaciones (25), puede escribirse como:

$$M_{RA} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$M_{RA} = \begin{bmatrix} 10,23 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10,23 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10,23 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,052 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,16 \end{bmatrix} \quad (59)$$

5.1.2. Masa añadida

Se dispone de un vehículo que opera a baja velocidad y que tiene tres planos de simetría, ya que los términos de la matriz de masa añadida dependen del formato del AUV estas características posibilitan no tener en cuenta los elementos de la matriz M_A , expresada según la ecuación (39) que están fuera de la diagonal principal [9].

De manera que las expresiones para determinar las matrices M_A y $C_A(v)$ pueden simplificar como:

$$M_A = -diag\{X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}\}, \quad (60)$$

Existe un conjunto de expresiones matemáticas que permiten calcular los coeficientes de la estructura diagonal de M_A [1]. Las mismas son aplicables en aquellos vehículos cuya forma geométrica sea similar a un esferoide alargado. El diseño actual, del AUV en estudio, permite realizar una aproximación a un esferoide alargado. Suponiendo que el vehículo en estudio tiene forma de elipsoide prolado, y aproximando su simetría en las tres direcciones espaciales, se toma la distancia entre los propulsores horizontales, perpendicular a la dirección de avance en dirección del eje x , como la dimensión b en la dirección del eje y del elipsoide. Así el semieje principal del elipsoide es la longitud total del vehículo a y el semieje secundario tiene como dimensión b .

Los parámetros de la matriz de masa añadida son constantes cuando el vehículo está completamente sumergido. Estos parámetros están generalmente en la vecindad de 10% a 100% de los parámetros correspondientes en la matriz de masa del cuerpo rígido [14]. Se han obtenido valores de $Xu \doteq -6,73\text{kg}$, $Yv \doteq -6.721\text{kg}$, $Zw \doteq -5,56\text{kg}$ $K_{ij} = -0,001\text{kg}\cdot\text{m}^2$ y $Mq \doteq Nr \doteq -0.01220 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. Los resultados obtenidos son coherentes, ya que suponen entre el 10% y el 70% de la magnitud de la masa del vehículo, lo que coincide con otros estudios realizados en vehículos autónomos.

La matriz de inercia, incluyendo las masas añadidas para el AUV, se expresa como la suma de las ecuaciones (59) y (60), según puede observarse en la ecuación (61).

$$M = M_{RA} + M_A = \begin{bmatrix} 16,96 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16,95 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15,79 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,053 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,132 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,172 \end{bmatrix} \quad (61)$$

5.1.3. Matriz de Coriolis

La matriz de Coriolis y centrípeta del cuerpo rígido, $C_{RA}(v)$ se obtiene reemplazando en la ecuación (28) los valores del vehículo en estudio.

$$C_{RA}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & 0 - mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_{zz}r & -I_{yy}q \\ mw & 0 & mu & -I_{zz}r & 0 & I_{xx}p \\ mv & -mu & 0 & I_{yy}q & -I_{xx}p & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$C_{RA}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 10,23w & -10,23v \\ 0 & 0 & 0 & -10,23w & 0 & 10,23u \\ 0 & 0 & 0 & 10,23v & -10,23u & 0 \\ 0 & 10,23w & -10,23v & 0 & 0,16r & -0,12q \\ 10,23w & 0 & 10,23u & -0,16r & 0 & 0,052p \\ 10,23v & -10,23u & 0 & 0,12q & -0,052p & 0 \end{bmatrix} \quad (63)$$

La matriz de Coriolis, relativa a los efectos hidrodinámicos derivados de la masa añadida al sistema, se puede calcular a partir de la matriz anterior y del operador $S(\lambda)$. Si se considera la matriz simétrica A_{Sim} , según la ecuación (43), su producto con el vector velocidad determina los coeficientes de $S(\lambda)$.

Tomando la diagonal principal de la matriz de masa añadida, la matriz de Coriolis de masa añadida, reemplazando en la ecuación (44), se expresa como:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 5,56w & -6,721v \\ 0 & 0 & 0 & 5,56w & 0 & 6,73u \\ 0 & 0 & 0 & 6,721v & -6,73u & 0 \\ 0 & 5,56w & -6,721v & 0 & 0,0122r & -0,0122q \\ -5,56w & 0 & 6,73u & -0,0122r & 0 & 0,001p \\ 6,721v & -6,73u & 0 & 0,0122q & -0,001p & 0 \end{bmatrix} \quad (65)$$

Realizando la suma de las ecuaciones (63) y (65) se obtiene la matriz de Coriolis, incluyendo la matriz de Coriolis de masa añadida, como:

$$C(v) = C_{RA}(v) + C_A(v),$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & (m - Z_w)w & -(m + Y_v)v \\ 0 & 0 & 0 & -(m + Z_w)w & 0 & (m - X_u)u \\ 0 & 0 & 0 & (m + Y_v)v & -(m + X_u)u & 0 \\ 0 & (m - Z_w)w & -(m + Y_v)v & 0 & (I_{zz} - N_r)r & -(I_{yy} + M_q)q \\ -(m + Z_w)w & 0 & (m - X_u)u & -I_{zz}r & 0 & (I_{xx} - K_p)p \\ (m + Y_v)v & -(m + X_u)u & 0 & (I_{yy} - M_q)q & -(I_{xx} - K_p)p & 0 \end{bmatrix} \quad (66)$$

5.1.4. Amortiguamiento hidrodinámico

Atendiendo a la simetría existente en el AUV, es posible establecer las siguientes relaciones matemáticas entre varios de los parámetros de la matriz $D(v)$ [1], [10]:

$$D_L = \{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\}, \quad (67)$$

$$D_Q = \{X_{u|u|}, Y_{v|v|}, Z_{w|w|}, K_{p|p|}, M_{q|q|}, N_{r|r|}\} \quad (68)$$

La matriz resultante de amortiguamiento dinámico resulta:

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u|}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v|}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w|}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|p|}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q|}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r|}|r| \end{bmatrix} \quad (69)$$

Los términos relativos al amortiguamiento hidrodinámico lineal y cuadrático identificados en las ecuaciones (67) y (68), se encuentran relacionados con la fuerza de arrastre del vehículo. Se calculan las fuerzas de arrastre para los tres ejes a diversas velocidades, tomando como valor máximo de velocidad 1m/seg , así como los momentos respectivos. El cálculo se realiza con el uso de software especializado de simulación y mediante iteración se obtiene la convergencia de los valores.

5.1.5. Términos Hidrostáticos

La matriz que contempla los efectos gravitacionales se encuentra definida por la ecuación (54), para el vehículo en estudio se realizan las siguientes consideraciones. En una primera instancia se considerará que el peso del vehículo es igual al empuje: $W = E$, con el fin de simplificar los cálculos, si bien en etapas posteriores se propone dar al AUV un peso levemente inferior al empuje con el fin de recobrar fácilmente el vehículo en caso de algún falla en los propulsores.

El sistema de coordenadas se emplazada en el centro de masa del vehículo y el centro de flotación es coincidente en el eje z con el centro de gravedad, considerando $z_G - z_A = AG_z$, luego consideramos el centro de flotación como el origen de coordenadas del sistema local, por lo cual la fuerza de flotación no producirá momentos, pero si lo hará la fuerza gravitatoria, por lo cual sustituyendo en la ecuación (54), se obtiene:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ AG_z WC_\theta S_\phi \\ AG_z WS_\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (70)$$

5.2.6. Fuerzas de Propulsión

El vector τ se puede calcular a partir de la matriz de orientación y posición L y el vector de fuerzas de los propulsores U .

$$\tau = LU \quad (71)$$

$$U = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{bmatrix} \quad (72)$$

La matriz L está formada por seis filas, para introducir el vector unitario de orientación (u) y el vector de posición (r) de cada propulsor, y cinco columnas, tantas como el número de propulsores.

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_1 & \dots & u_N \\ r_1 & r_2 & \dots & r_N \end{bmatrix}$$

La matriz L , para un número de propulsores igual a cinco, y su localización según la *Figura 4*, tiene la siguiente forma:

$$L = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\alpha & \text{sen}\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & l_4 & -l_4 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 & l_3 & -l_5 \\ l_1\cos\alpha + l_2\text{sen}\alpha & -l_1\cos\alpha - l_2\text{sen}\alpha & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (73)$$

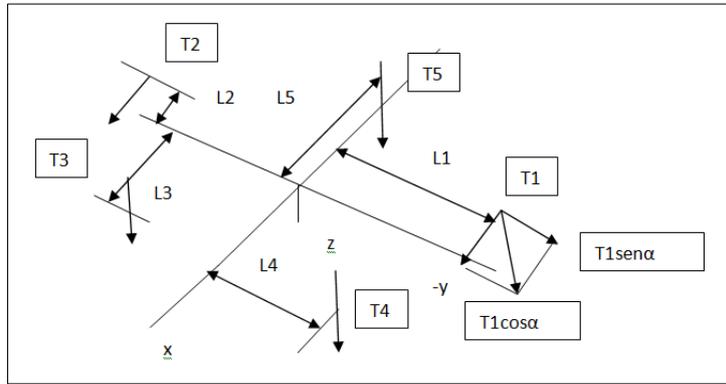


Figura 4

La figura 4 muestra la numeración de los motores del AUV y las distancias en las que los motores están separados del centro de gravedad. Estas distancias son: $L_1= 14\text{cm}$, $L_2= 13\text{cm}$, $L_3= 13\text{cm}$, $L_4= 10\text{cm}$ y $L_5= 13\text{cm}$. El ángulo $\alpha= 30^\circ$.

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \\ \tau_K \\ \tau_M \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_1 + T_2)\cos\alpha \\ (T_2 - T_1)\text{sen}\alpha \\ T_4 + T_3 + T_5 \\ (T_3 - T_4)l_4 \\ T_3l_3 + T_4l_3 - T_5l_5 \\ (T_1 - T_2)(l_1\cos\alpha + l_2\text{sen}\alpha) \end{bmatrix} \quad (74)$$

Reemplazando, en la ecuación (71), los valores anteriores y realizando las operaciones correspondientes se obtiene el vector de fuerzas y momentos provocados por las entradas de control como se expresa en la ecuación (74).

Como se observa quedan así definidos todos los términos matriciales que conforman el modelo no lineal, de seis grados de libertad (6GDL), del diseño presentado respondiendo a la ecuación vectorial (37).

La Tabla 3 presenta los parámetros principales del vehículo considerando la geometría del AUV y que el mismo se moverá a muy baja velocidad, calculados con el programa "SolidWork" y la herramienta "Simulink" de MATLAB.

La obtención del modelo de 6 GDL permitirá en estudios posteriores, sintetizar los lazos de control que se deseen implementar en el vehículo.

Parámetros	Valores	Unidades	Descripción
X_u	-6,73	Kg	Masa añadida
$X_{\dot{u}}$	-10	Kg/s	Amortiguamiento lineal
$X_{u v u v}$	-14,6	kg/m	Arrastre axial
Y_v	-6,72	Kg	Masa añadida
$Y_{\dot{v}}$	-12	Kg/s	Amortiguamiento lineal
$Y_{v v v v}$	-16,6	kg/m	Arrastre de flujo cruzado
Z_w	-5,56	Kg	Masa añadida
$Z_{w v w v}$	-19,6	kg/m	Arrastre de flujo cruzado
$Z_{\dot{w}}$	-17	Kg/s	Amortiguamiento lineal
K_p	-0,001	Kg.m ²	Masa añadida
$K_{\dot{p}}$	-1,4	Kg/s	Amortiguamiento lineal
$K_{p v p v}$	-1,15	kg/m	Arrastre de rolido
M_q	-0,012	Kg.m ²	Masa añadida
$M_{\dot{q}}$	-1,6	Kg/s	Amortiguamiento lineal
$M_{q v q v}$	-1,19	kg/m	Arrastre de flujo cruzado
N_v	-0,012	Kg.m ²	Masa añadida
$N_{\dot{r}}$	-1,6	Kg/s	Amortiguamiento lineal
$N_{r v r v}$	-1,19	kg/m	Arrastre de flujo cruzado

Tabla 3: Parámetros hidrodinámicos

Contando con todos los parámetros del modelo de 6 GDL del vehículo, se puede analizar, mediante simulación, el comportamiento del mismo utilizando la herramienta *TOOLBOX MSS* perteneciente al MATLAB.

6. Resultados obtenidos

A partir de una simulación con la herramienta SIMULINK de MATLAB y utilizando los parámetros obtenidos en el apartado 5, pudo visualizarse las características dinámicas del AUV en una trayectoria como muestra la figura 6.

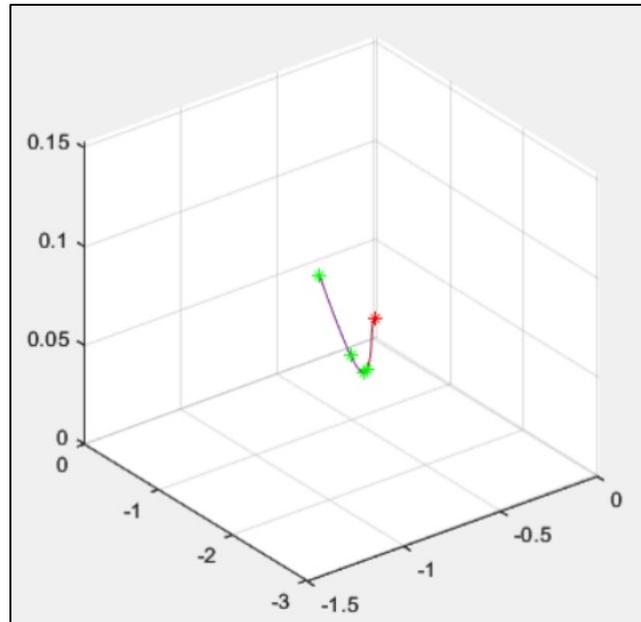


Figura 6. Trayectoria simulada de AUV

Para esta trayectoria se obtuvieron las velocidades de cada eje de coordenadas.

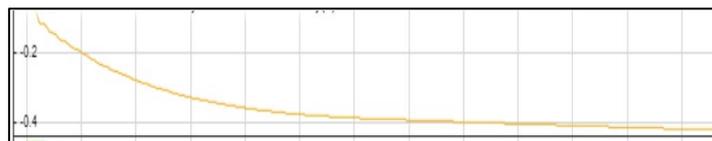


Figura 7. Velocidad sobre el eje (1)

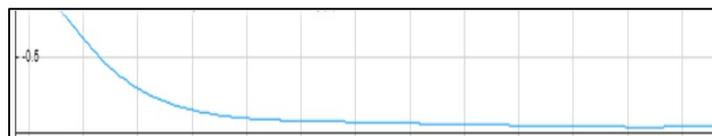


Figura 8. Velocidad sobre el eje (2)

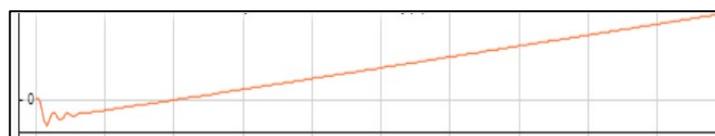


Figura 9. Velocidad sobre el eje (3)

Los resultados obtenidos son consistentes con trabajos realizados sobre otros AUV de características similares [11] y con otras simulaciones [13].

7. Conclusiones

El estudio de las características dinámicas del vehículo propuesto permitió obtener parámetros para estudiar su comportamiento mediante simulaciones que puedan utilizarse para analizar el comportamiento del AUV ante distintas condiciones de operación, y de ese modo, evaluar su desempeño y/o proponer mejoras.

8. Referencias

- [1] Fossen, T. I. (1994). **Guidance and Control of Ocean Vehicles**, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-94113-1, Chichester, England.
- [2] Antonelli G., 2006, \Underwater Robots". Springer, 2nd Edition.
- [3] Fossen, T. I., Pettersen, K. Y., 2014. On uniform semiglobal exponential stability (USGES) of proportional line-of-sight guidance laws. *Automatica* 50 (11), 2912–2917.
- [4] Fossen, T. I., 1991, \Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles", PhD Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- [5] T.I. Fossen, & A. Ross, "Advances in unmanned marine vehicles" en *Nonlinear modelling, identification and control of UUVs*, vol. 69, Roberts & Sutton, Ed. Gran Bretaña: Peter Peregrinus LTD, 2006, pp 13-42.
- [6] SNAME, 1950, \Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid". The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No. 1-5.
- [7] Meriam, J. L. *Dinámica*, 1994 ISBN 10:[8429141294](#)/ISBN 13:[9788429141290](#). Editorial Reverte – Barcelona.
- [8] Cruz, J. M., Aranda, J., Girón, J. M., 2012. Tutorial automática marina: una revisión desde el punto de vista del control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9 (3), 205–218.
- [9] Fossen, T. I., 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, ISBN: 978-1-119-99149-6, Nueva York,
- [10] Da Silva, J. E., Terra, B., Martins, R., de Sousa, J. B., 2007. Modeling and simulation of the LAUV autonomous underwater vehicle. En: *13th IEEE IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. IFAC, Szczecin, Polonia, pp. 149–153.
- [11] Battista, T., Woolsey, C., Perez, T., Valentini, F., 2016. A dynamic model for underwater vehicle maneuvering near a free surface. *IFAC-PapersOnLine* 49(23), 68–73.
- [12] Skjetne, R., Smogeli, O., Fossen, T. I., 2004. Modeling, identification, and adaptive maneuvering of *cybership ii*: a complete design with experiments. En: *Control Applications in Marine Systems CAMS04*. IFAC, Ancona, Italia, pp. 203–208.

- [13] Wang, C., Zhang, F., Schaefer, D., 2015. Dynamic modeling of an autonomous underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Technology* 20 (2), 199–212.
- [14] W. Wang and C. M. Clark. Modeling and Simulation of the VideoRay Pro III Underwater Vehicle. University of Waterloo, 2001; *Key Information: Kinematic Model, Dynamic model.*
- [15] (Jalving, 1994; Hong y otros, 2010).

Simulación con MATLAB y SIMULINK de un modelo de UAV

Mabel Bottoni

Alejandro Molina

Germán Fernández Madarieta

1. Antecedentes

La ventaja de la simulación mediante componentes de algunos programas de cálculo computacional es que la solución analítica de muchas de las ecuaciones de un modelo real es extremadamente compleja. Por ello se suele recurrir a simplificaciones sobre la geometría del UAV para simplificar los cálculos, o se imponen condiciones de funcionamiento como baja velocidad, limitación de desplazamientos, etc. En este caso el vehículo submarino autónomo es el mostrado en la Figura 1.

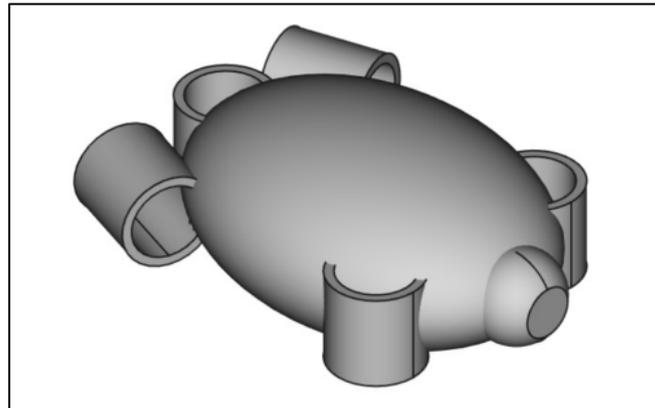


Figura 1

Este vehículo fue diseñado como AUV liviano para realizar tareas de inspección de cascos, estructuras sumergidas, muestreos de fauna marina y tareas oceanográficas en general. Se desprende del tipo de operación que se pretende de él, que su desplazamiento no será a alta velocidad, ni requerirá de maniobras bruscas, lo que permitiría realizar algunas suposiciones para

simplificar la solución analíticas de sus ecuaciones dinámicas. Así toda la simulación mediante el uso de Matlab Y Simulink, permiten ver las características de su funcionamiento a partir de un modelado más sencillo que la aplicación de las ecuaciones del UAV.

La simulación utilizada puede verse en la siguiente figura:

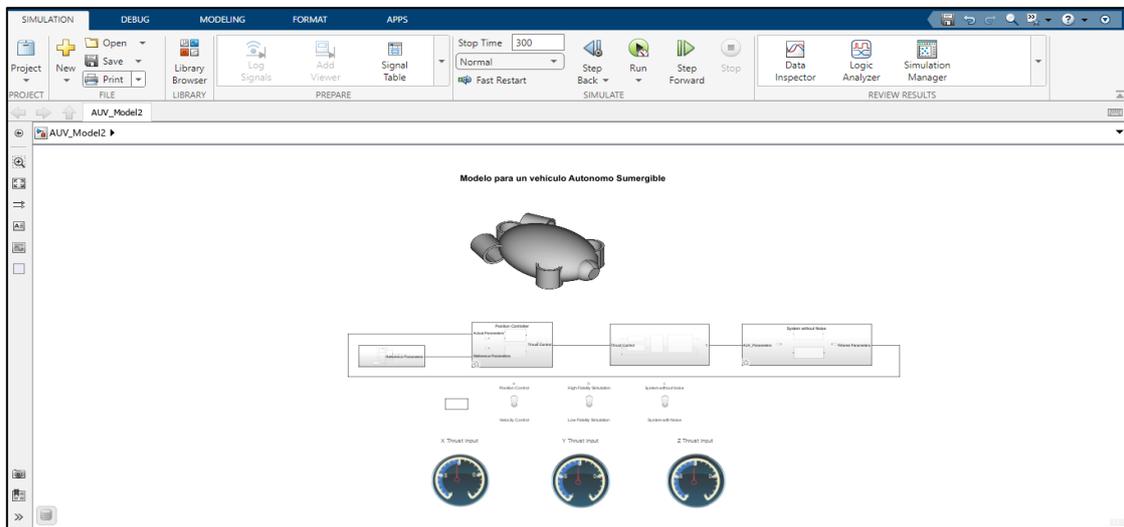


Figura 2

2. Consideraciones sobre el modelo que se utilizó

Siguiendo la metodología propuesta por Veeralla [b], la primer consideración es sobre la dinámica del submarino, el cual tiene muchas similitudes con aeroplanos a partir de considerar que las principales fuerzas y momentos que actúan generan un sistema con 6 grados de libertad, los cuales podemos ver en las figuras 3 y 4.

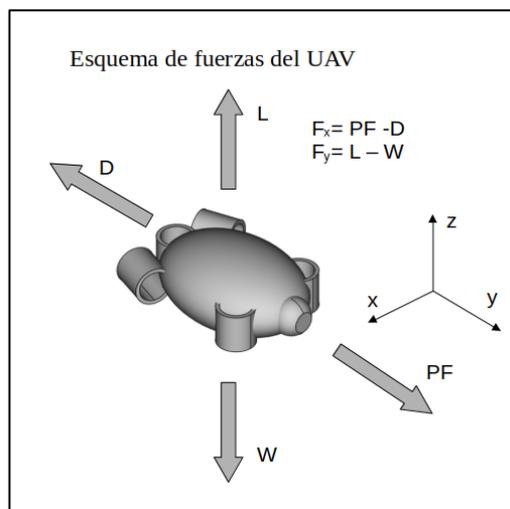


Figura 3

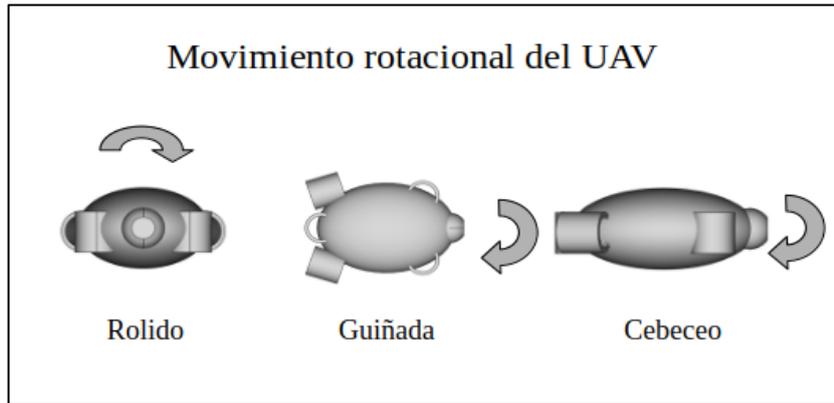


Figura 4

Dado que se puede hacer una analogía entre el UAV y un aeroplano, utilizando el AEROSPACE BLOCKSET de Simulink, se dispone de herramientas que permiten resolver las ecuaciones de movimiento sin realizar cálculos complejos, una de esta es el 6-DOF BLOCK (Figura 5), que permite integrar las fuerzas y momentos en todas las direcciones.

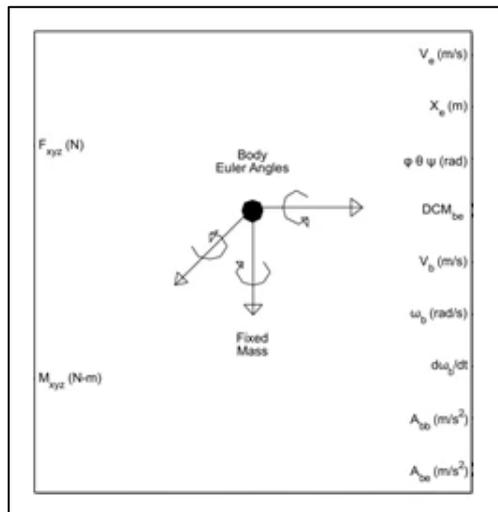


Figura 5

Otras de las herramientas a utilizar son los ROTATION BLOCKS y los COORDINATE TRANSFORMATION BLOCKS (figura 6), que permiten la alineación de las fuerzas y momentos en las direcciones adecuadas.

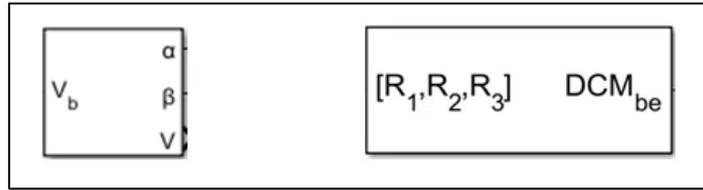


Figura 6

Por último, se utiliza el IMU SENSOR MODEL, para introducir perturbaciones en las variables utilizadas como ocurriría en la realidad.

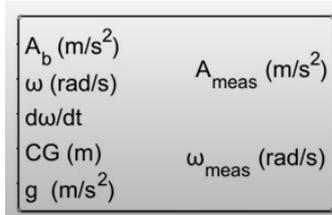


Figura 7

A fin de simular el comportamiento del AUV de forma real, lo incluimos en un entorno funcional, para lo cual se debe introducir elementos de control que actúen sobre el UAV, generando para este caso el diagrama mostrado en la figura 8.

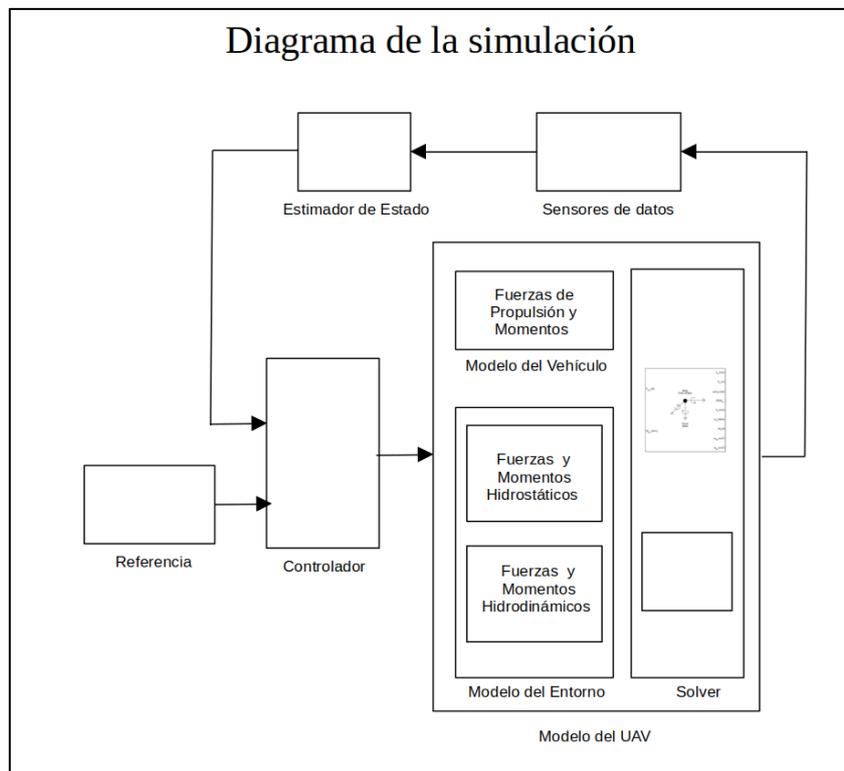


Figura 8

El bloque de referencia genera una entrada que representa una cierta posición o velocidad deseada, el controlador actúa en función de esta y de la

estimación realizada mediante el sensor y el estimador sobre la ubicación o estado del modelo del UAV.

El modelo del UAV por su parte, está compuesto de un modelo de las fuerzas y momentos de propulsión y de un modelo del entorno, que incluye como componentes las fuerzas y momentos hidrodinámicos y las fuerzas y momentos hidrostáticos.

El modelo se opera estimando las fuerzas actuantes, para lo cual si introduce la acción de los motores de propulsión y las reacciones del medio sobre el vehículo, con el modelo del UAV ya construido, se prueba el comportamiento a lazo abierto y se verifica que tipo de control aplicar para que este sea el óptimo según las condiciones de funcionamiento deseadas. La metodología utilizada en el proceso de estudio a lazo abierto se baso en el trabajo de Ridley, Fontan y Corke [a]. Este proceso se describe en la siguiente figura:

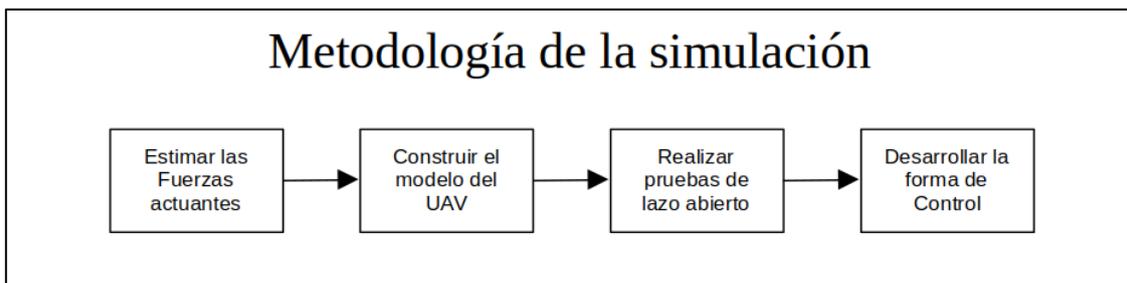


Figura 9

3. Implementación del Modelo

Los componentes del Sistema de la implementación realizada en Simulink (figura 10) son los que se definieron en la estructura del modelo funcional antes descrito y cuyos subsistemas son los siguientes:

- Subsistema 1 - *Propulsion Forces and Moments*:
- Subsistema 2 - *Enviromental Forces and Moments*
- Subsistema 3 - *Combine Forces and Moments*
- Subsistema 4 - *Dinamic Solver*

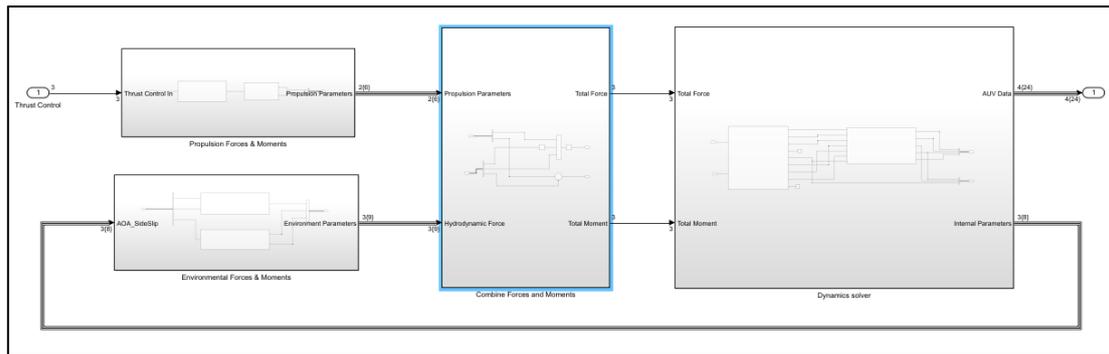


Figura 10

El Subsistema *Propulsion Forces and Moments* está compuesto de un subsistema *Inputs Command to Thrust* que recibe las entradas de un controlador que las transforma en señales a los motores para que estos generen los accionamientos sobre el UAV que en el bloque de *Force and moments due to Thrust* donde las señales de los accionamientos se transforman en fuerzas y momentos de propulsión constituyendo los parámetros de propulsión: *Propulsion parameters*. Esto se puede apreciar en la figura 11.

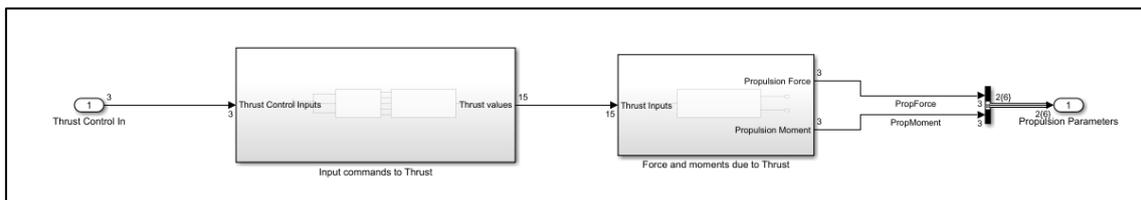


Figura 11

La transformación de las entradas en accionamiento de empuje de los motores se realiza transformando dichas entradas en señales PWM para accionar los motores, para lo que se utiliza una función transferencia obtenida del SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX, que utiliza datos de Blue Robotics obtenidos de motores T100 y T200, similares a los utilizados por el UAV. Este bloque se muestra en la siguiente figura:

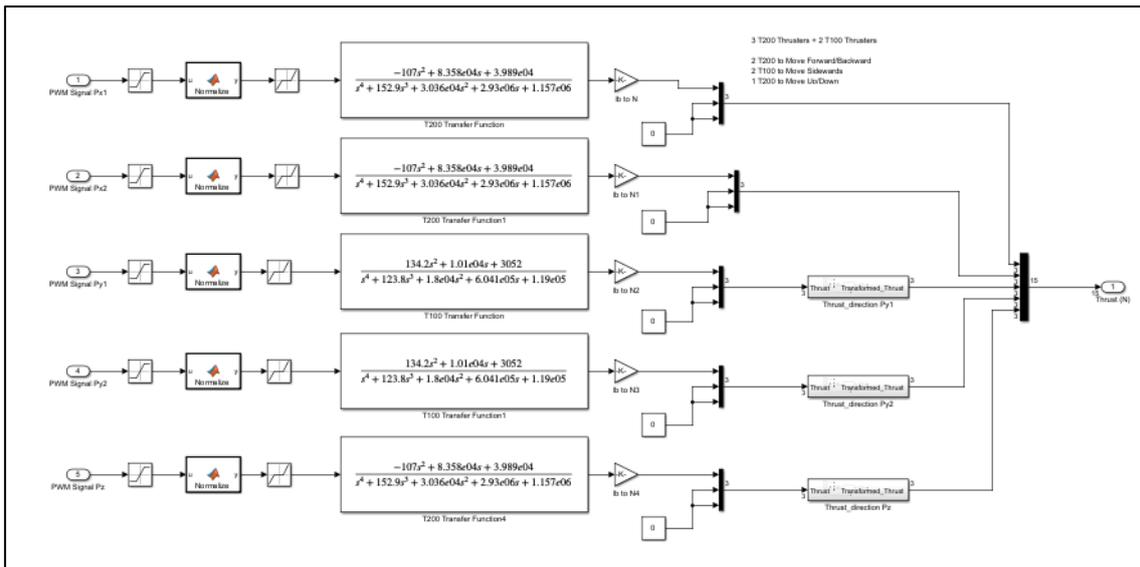


Figura 12

El Subsistema *Environmental Forces and Moments* está conformado por un subsistema que obtiene las fuerzas hidrostáticas y otro que obtiene las fuerzas u momentos hidrodinámicos, como se ve en la figura 11.

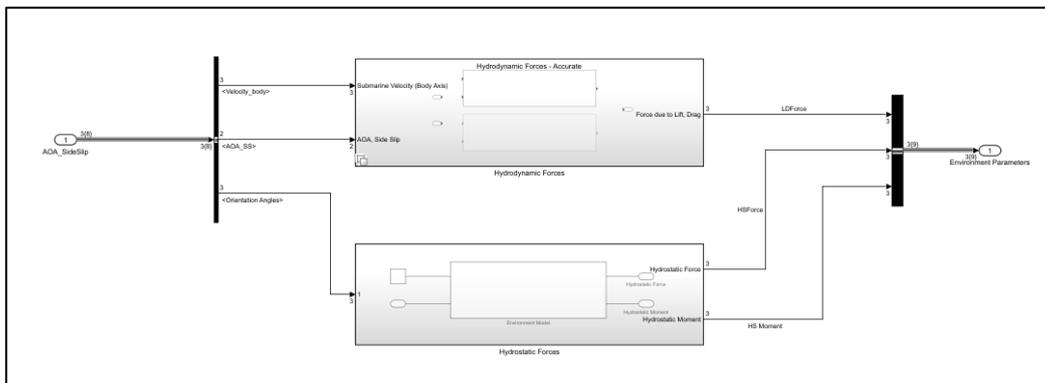


Figura 13

El subsistema hidrostático: Hydrostatic forces, básicamente utiliza el peso y el empuje del agua sobre el UVA, como puede verse en la parametrización que se muestra en la figura 14.

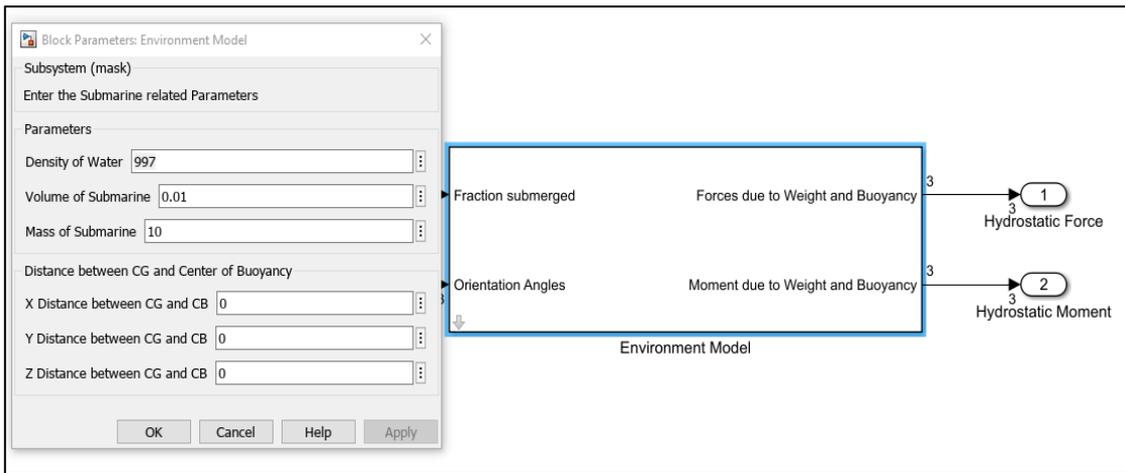


Figura 14

El subsistema que contempla las fuerzas hidrodinámicas: *Hydrodynamic Forces* puede trabajarse en modo de preciso o poco preciso, para ello se puede simplificar el modelo introduciendo restricciones que reducen la complejidad de los cálculos a cambio de la pérdida de precisión, dado que la elección es posible el modelo se simuló utilizando el bloque *Hydrodynamic Forces-Accurate*.

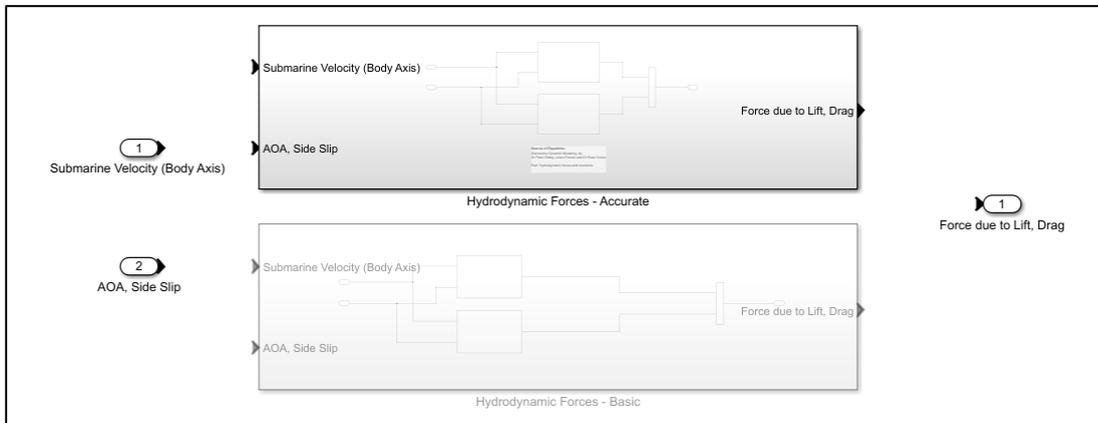


Figura 15

El subsistema *Dinamic Solver* recibe las fuerzas y los momentos devuelve el comportamiento del AUV, como vimos en el modelo conceptual anterior su núcleo es el 6-DOF BLOCK que genera las posición y ángulos del AUV tomado como un cuerpo rígido. Pero estos datos deben ser procesados para que se integren con los otros subsistemas, lo que se realiza mediante el bloque de POSTPROCESSING. Esta disposición puede verse en la figura 16.

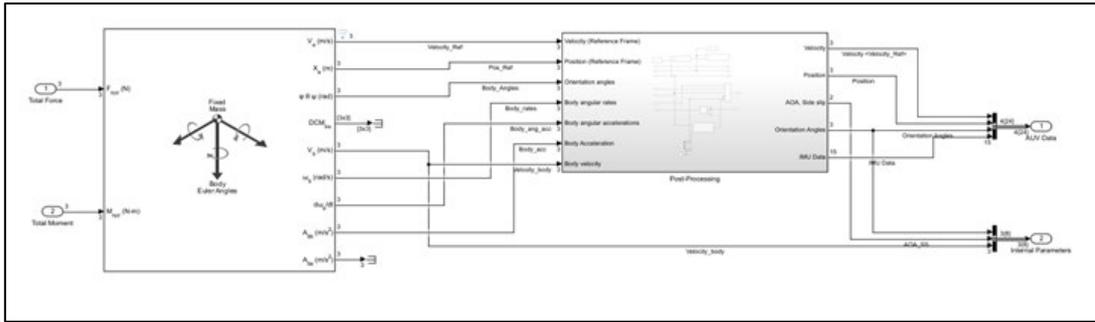


Figura 16

El subsistema *Combine Forces and Moments* realiza la comparación de la entrada deseada con la situación actual del AUV y actúa como un controlador PID que permite utilizar este modelo dentro de una simulación del vehículo. Este subsistema se puede ver en la figura 17.

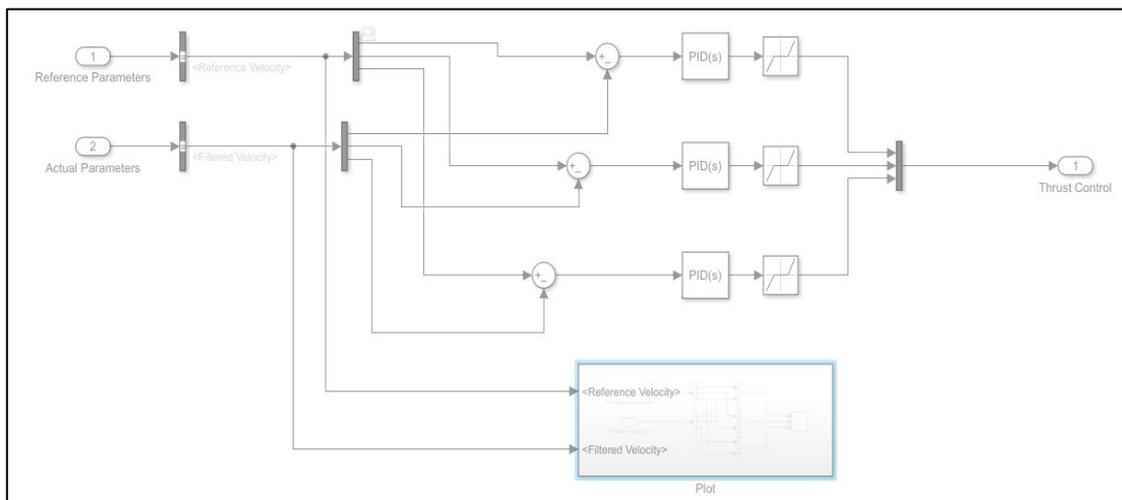


Figura 17

La utilidad de este modelo radica en la posibilidad de simular en forma sencilla la dinámica del AUV dentro de una simulación como la que plantea Yashodhar Veeralla [b].

El modelo de referencia se puede apreciar en la siguiente figura:

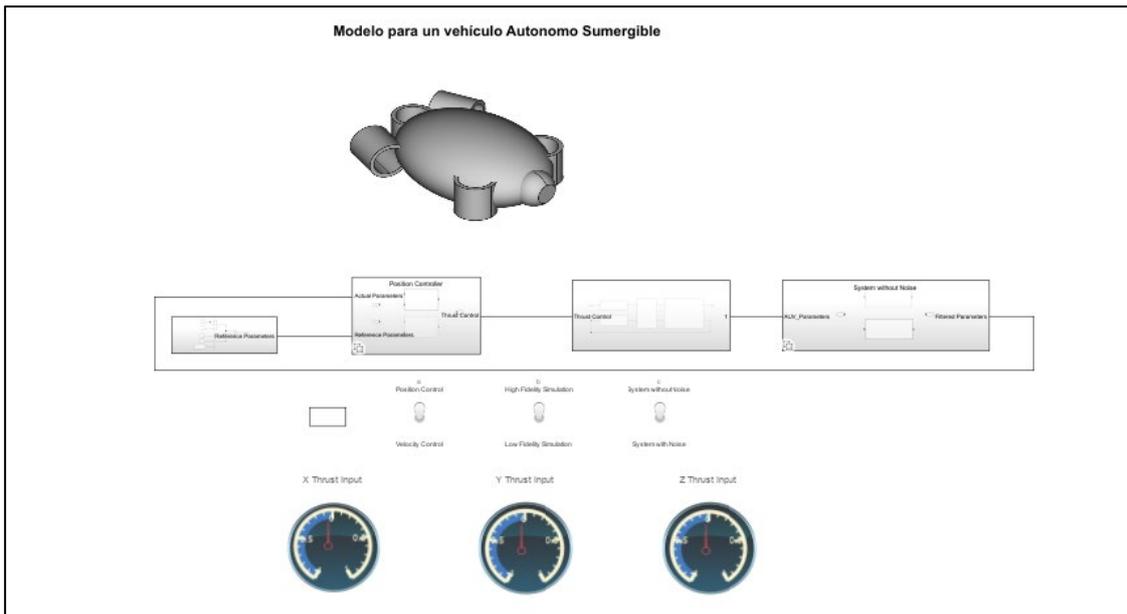


Figura 18

Aquí el modelo planteado se integra con un subsistema de sensores y generadores de ruido, que introduce las perturbaciones del mundo real, el subsistema *Sensor data and State Estimation*, que envía la información de los parámetros actuales del AUV al subsistema *Translation Controller* quien lo compara con los parámetros de referencia enviados por el subsistema *Translational Reference*.

4. Algunos resultados obtenidos

El modelo planteado se somete a una simulación para una trayectoria sin perturbaciones, la trayectoria permite ver como varían los parámetros del modelo dinámico del AUV.

La trayectoria en un sistema de 3 dimensiones se muestra en la figura 19.

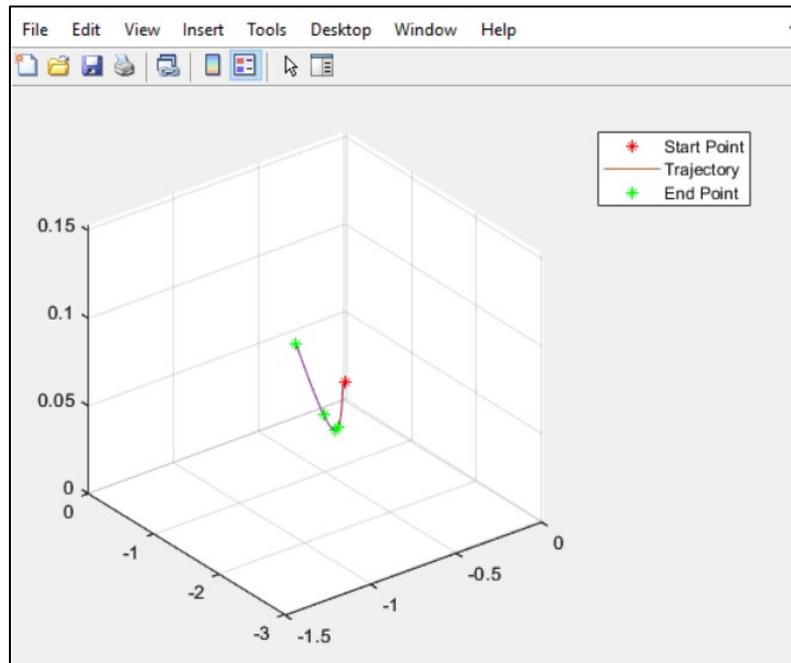


Figura 19

Para ver el comportamiento dinámico de las principales variables del vehículo monitoreamos las señales del subsistema *Dinamic Solver*, quien recibe las fuerzas y los momentos devuelve el comportamiento del AUV, mediante el 6-DOF BLOCK que genera las posiciones y velocidades del vehículo. Las señales de posición y velocidad para la trayectoria mostrada en la figura 19 se muestran en la figura 20.

En la figura 21 se muestra el empuje y la velocidad del vehículo tomada como un cuerpo rígido. De la comparación entre el empuje la velocidad y la posición, se puede apreciar un comportamiento sobre amortiguado, donde las fuerzas inerciales son claramente inferiores a las de Coriolis y de rozamiento, a pesar de que se minimizó las consideraciones sobre las mismas.

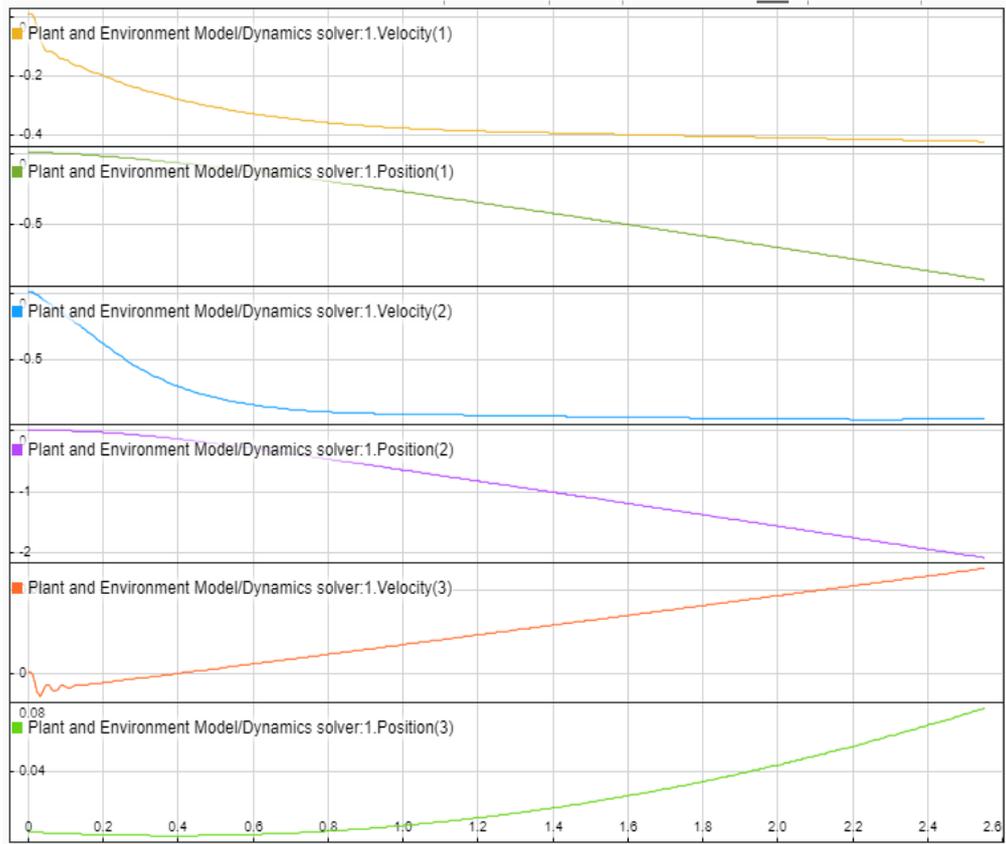


Figura 20

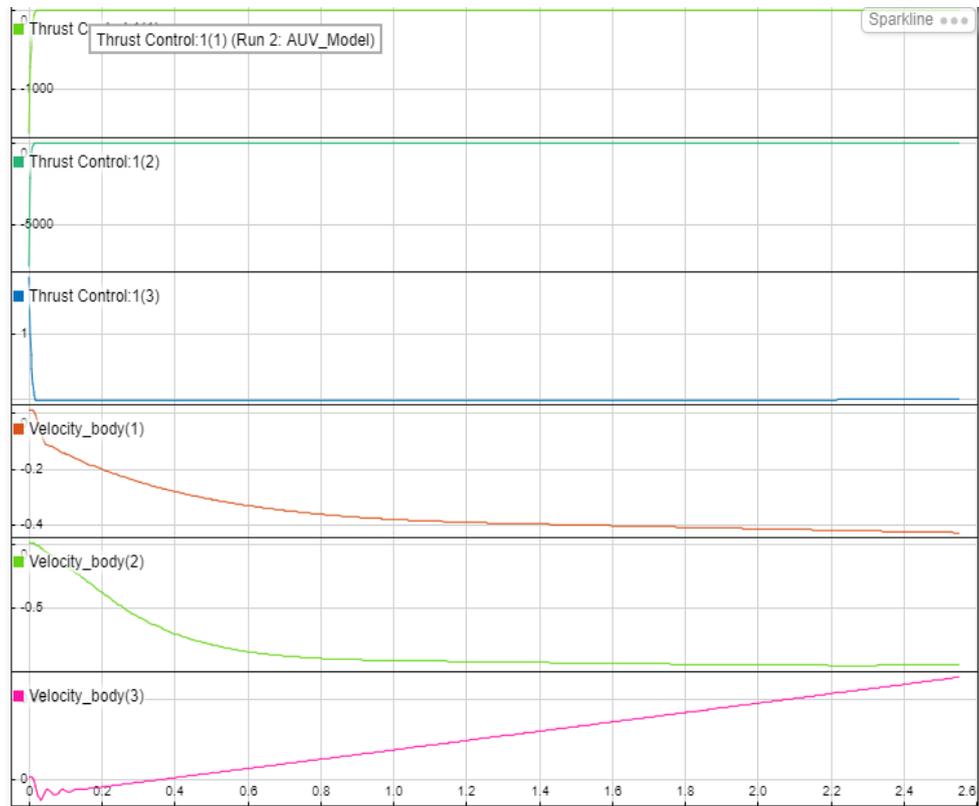


Figura 21

Al introducir perturbaciones, las señales de posición y velocidad para la trayectoria mostrada en la figura 22, se muestran en la figura 23. En la figura 24 se muestra el empuje y la velocidad del vehículo. Al igual que antes el comportamiento es sobre amortiguado, y puede verse que las perturbaciones solo influyen el inicio de la respuesta del AUV a las fuerzas de empuje.

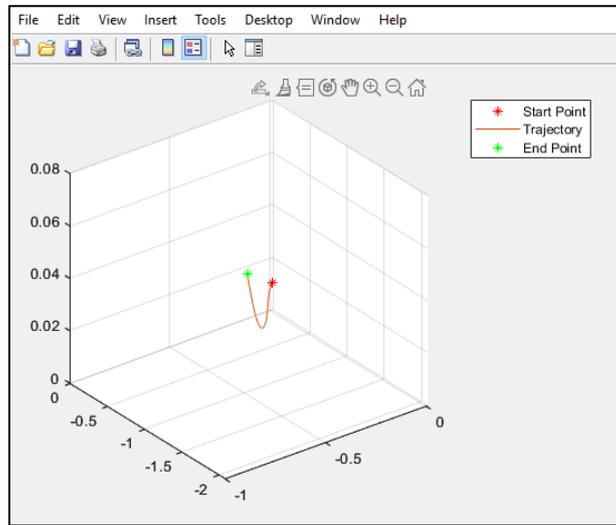


Figura 22

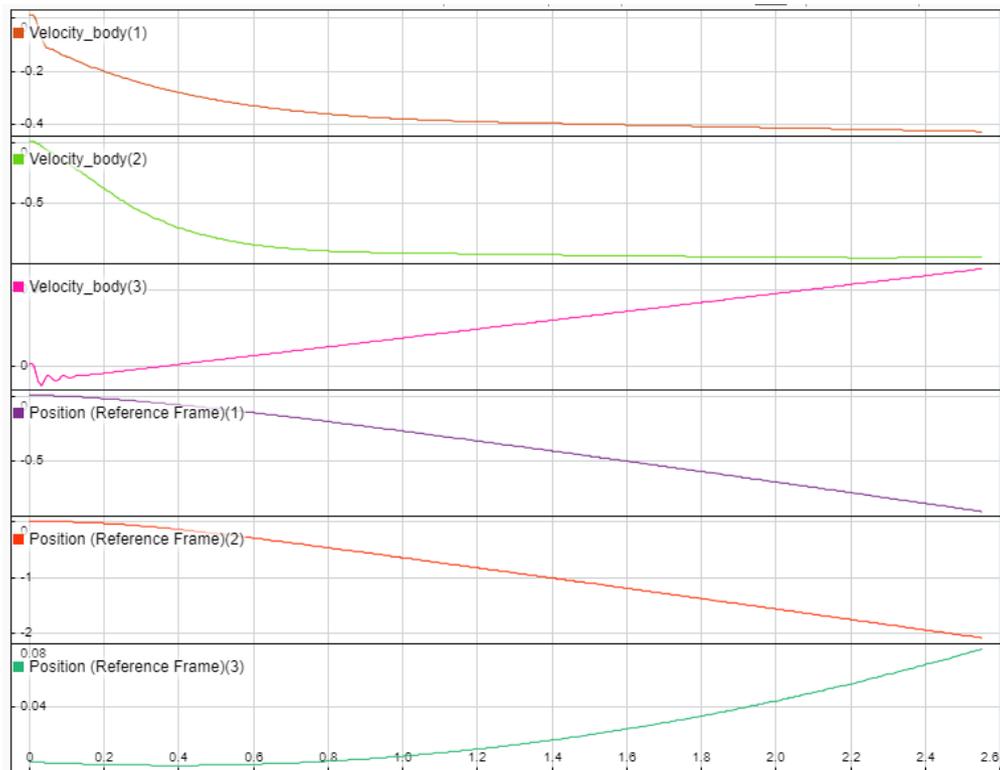


Figura 23

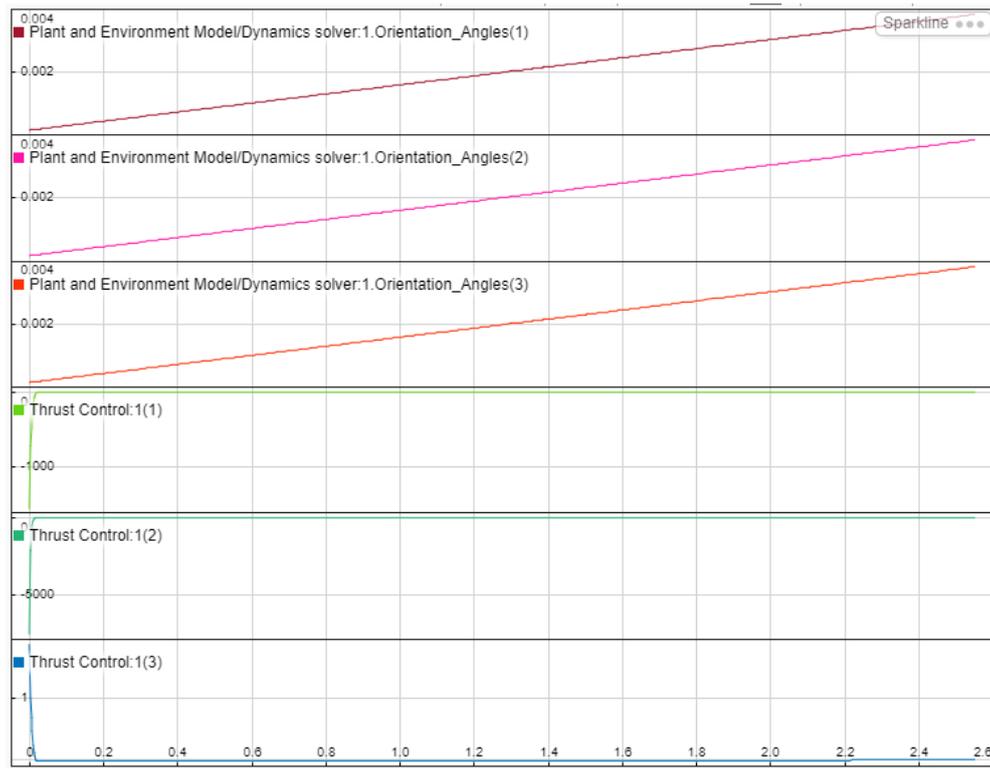


Figura 24

La simulación de complementó con la obtención de otros datos. En la figura 25 se muestra el efecto de las perturbaciones sobre la fuerza de empuje.

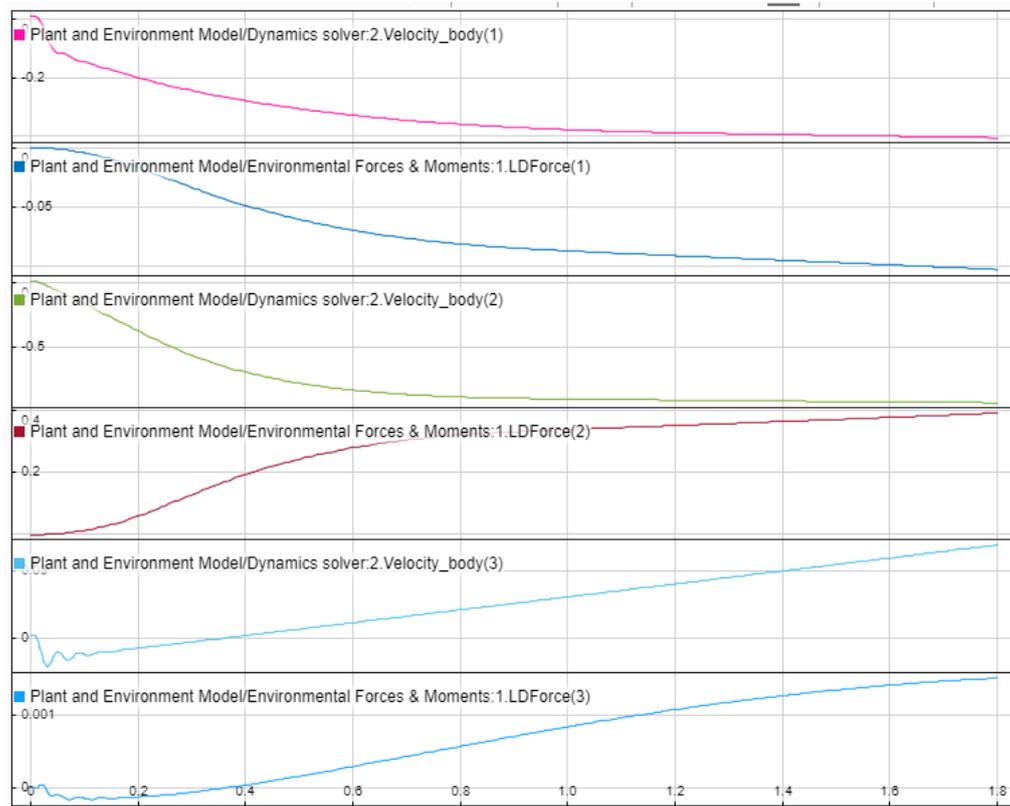


Figura 25

En la figura 26 se muestra las relaciones entre la velocidad del UAV y los ángulos de desplazamiento.

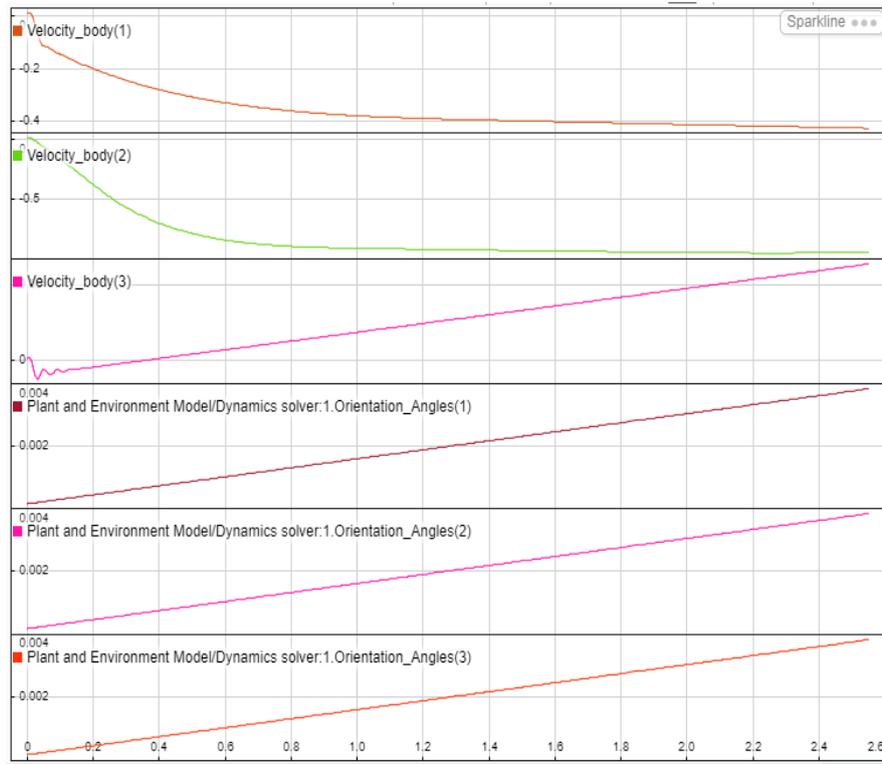


Figura 26

En la figura 27 se muestra las relaciones entre velocidad y fuerza en presencia de perturbaciones.

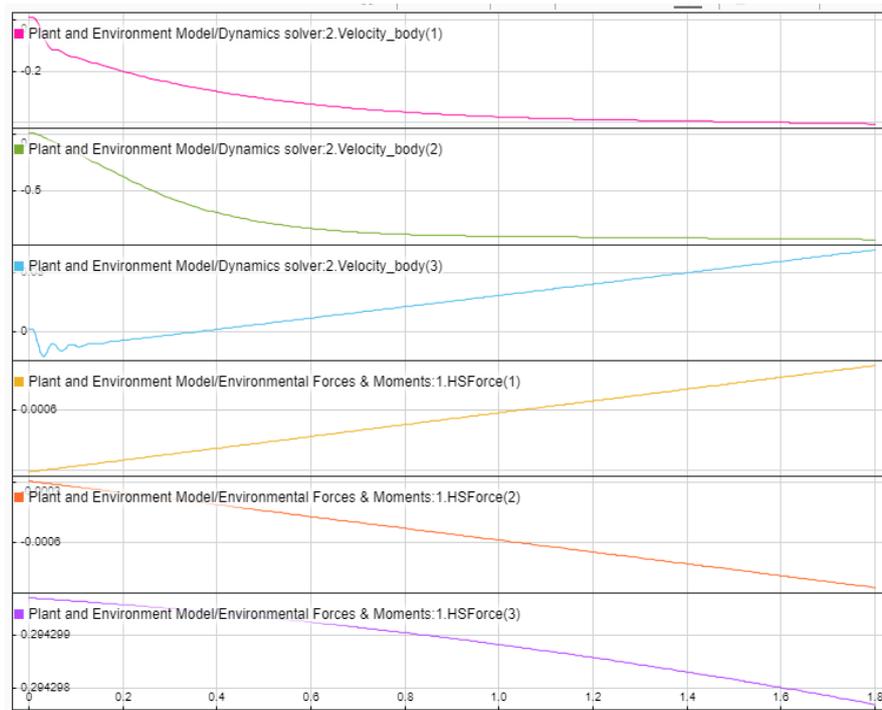


Figura 27

La figura 28 se muestra las relaciones entre la orientación angular y las fuerzas actuantes sin perturbaciones.

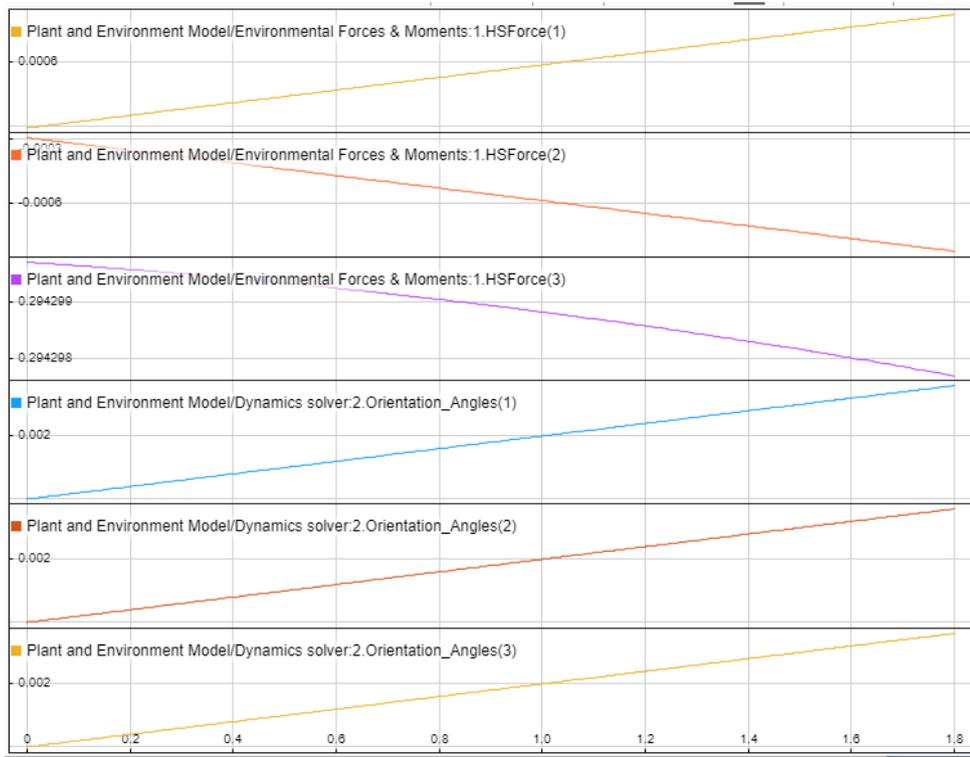


Figura 28

En la figura 29 se muestra las relaciones entre la posición del UAV respecto de los ejes y los ángulos de desplazamiento.

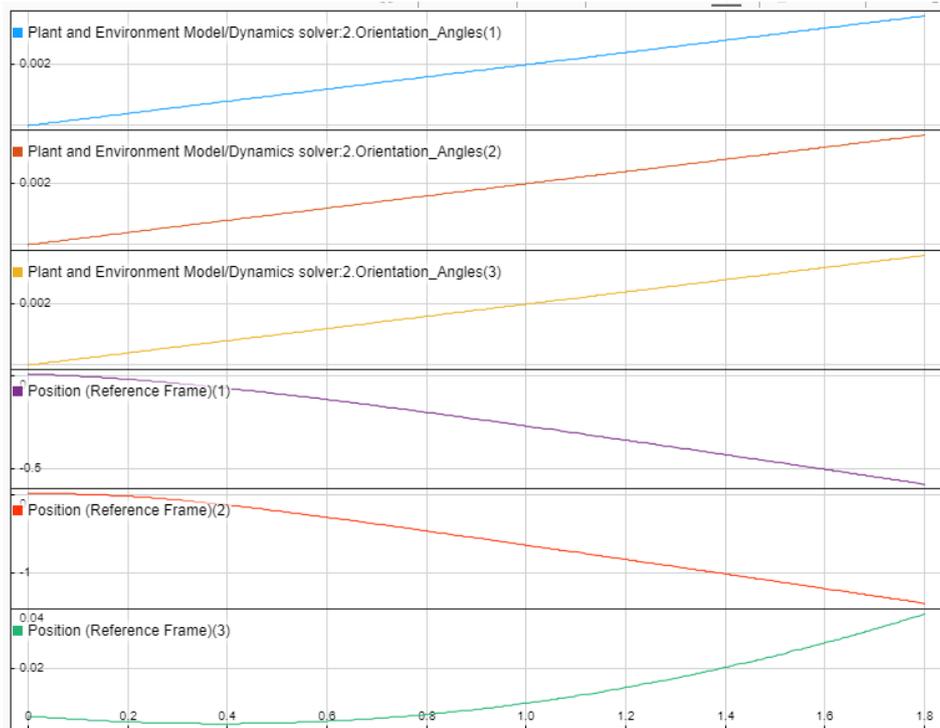


Figura 29

5. Conclusiones

La utilización de la metodología propuesta por Veeralla, a partir de las similitudes entre la dinámica de un vehículo submarino con la dinámica de los aeroplanos, generó un método de simulación útil para analizar la dinámica del AUV, considerado como un sistema con 6 grados de libertad. La analogía entre el UAV y un aeroplano, utilizando el AEROSPACE BLOCKSET de Simulink demostró que se podía obtener una descripción de la dinámica del vehículo sin recurrir a cálculos complejos.

6. Bibliografía

Allotta B, Caiti A, Costanzi R, Fanelli F, Fenucci D, Meli E, Ridolfi A. A new AUV navigation system exploiting unscented Kalman filter. *Ocean Engineering*. 2016;113:121-2.<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.058>.

ArduPilot Project. ArduSub. Available online: <https://www.ardubot.com/> (accessed on 12 April 2022).

Batmani Y, Davoodi M, Meskin N. Nonlinear suboptimal tracking controller design using statedependent riccati equation technique. *IEEE Transactions Control Systems Technology*. 2017;25(5):1833-9. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2617285>

Blevins R. D. [1984], *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., 1984. Newman J.N. [1980], *Marine Hydrodynamics* (third edition), MIT Press, 1980.

Blue Robotics Inc. BlueROV2 Heavy Configuration Retrofit Kit. SKU: BROV2-HEAVY-RETROFIT-R2-RP. Available online: <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2-upgrade-kits/brov2-heavy-retrofit-r1-rp/> (accessed on 12 April 2022).

Blue Robotics Inc. Low-Light HD USB Camera. SKU: CAM-USB-WIDE-R1-RP. Available online: <https://bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/cam-usb-low-light-r1/> (accessed on 12 April 2022).

Blue Robotics Inc. Ping Sonar Altimeter and Echosounder. SKU: PING-SONAR-R3-RP. Available online: <https://bluerobotics.com/store/sensors-sonars-cameras/sonar/ping-sonar-r2-rp/> (accessed on 12 April 2022).

Blue Robotics Inc. T200 Thruster. SKU: T200-THRUSTER-R2-RP. Available online: <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/> (accessed on 12 April 2022).

ByDevendra K. Chaturvedi 2017 *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink 1st Edition* CRC Press Boca Raton

ByHarold Klee, Randal Allen 2017 *Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink® 3rd Edition* CRC Press Boca Raton

Chambers S. [2001] , *Dynamics of an Autonomous Underwater Vehicle*, Undergraduate Thesis, Faculty of Built Environment and Engineering , Queensland University of Technology, 2001.

CMLabs. Theory Guide: Vortex Software's Multibody Dynamics Engine. Available online: https://www.cmlabs.com/vortexstudiodocumentation/Vortex_User_Documentation/Content/Concepts/Vortex_Dynamics_Theory_final.pdf (accessed on 12 April 2022).

Collins, J.; Chand, S.; Vanderkop, A.; Howard, D. A review of physics simulators for robotic applications. *IEEE Access* 2021, 9, 51416–51431. [Google Scholar] [CrossRef]

Das B, Subudhi B, Pati BB. Employing nonlinear observer for formation control of AUVs under communication constraints. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*. 2015;3(2/3):122-55. <https://doi.org/10.1108/IJIUS-04-2015-0004>.

de Cerqueira Gava, P.D.; Jorge, V.A.M.; Nascimento, C.L., Jr.; Adabo, G.J. AUV Cruising Auto Pilot for a Long Straight Confined Underwater Tunnel. In *Proceedings of the 2020 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Montreal, QC, Canada, 24 August–20 September 2020; pp. 1–8. [Google Scholar] [CrossRef]

Dhanak M.R, An P. E., Holappa K. [2001] An AUV Survey in the Littoral Zone: Small Scale Subsurface Variability Accompanying Synoptic Observations of Surface Currents, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, October 2001.

Dukan, F. ROV Motion Control Systems. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2014. [Google Scholar]

Foresti G.L. [2001] Visual Inspection of Sea Bottom Structures by an Autonomous Underwater Vehicle, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: cybernetics*, Vol. 31, No. 5, October 2001.

Fossen, T.I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2011. [Google Scholar]

Fresk, E.; Nikolakopoulos, G. Full quaternion based attitude control for a quadrotor. In *Proceedings of the 2013 European Control Conference (ECC)*, Zurich, Switzerland, 17–19 July 2013; pp. 3864–3869. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

Gazebo, an Open Source Robotics Foundation Simulator. Simulation Description Format (SDF). Available online: <http://sdformat.org/> (accessed on 12 April 2022).

Geranmehr B, Nekoo SR. Nonlinear suboptimal control of fully coupled non-affine six-DOF autonomous underwater vehicle using the statedependent

Riccati equation. *Ocean Engineering*. 2015; 96:248-57. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.032>.

Haidu, A.; Hsu, J. Bouyancy. 2014. Available online: <https://gazebosim.org/tutorials> tut=hydrodynamics&cat=physics (accessed on 12 April 2022). Open Source Robotics Foundation. Aerodynamics. 2014. Available online: <http://gazebosim.org/tutorials> tut=aerodynamics&cat=physics (accessed on 12 April 2022).

Haidu, A.; Hsu, J. Fluids. 2014. Available online: <https://gazebosim.org/tutorials> tut=fluids&cat=physics (accessed on 12 April 2022).

Hart, J.C.; Francis, G.K.; Kauffman, L.H. Visualizing Quaternion Rotation. *ACM Trans. Graph.* 1994, 13, 256–276. [Google Scholar] [CrossRef]

Imagenex Technology Corp. 881L Profiling–Digital Multi-Frequency Profiling Sonar. Available online: <https://imagenex.com/products/881l-profiling> (accessed on 12 April 2022).

Isa K, Arshad MR, Ishak S. A hybrid-driven underwater glider model, hydrodynamics estimation, and an analysis of the motion control. *Ocean Engineering*. 2014;81:111-29. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.02.002>.

Jorge, V.A.M.; de Cerqueira Gava, P.D.; de França Silva, J.R.B.; Mancilha, T.M.; Vieira, W.; Adabo, G.J.; Nascimento, C.L., Jr. Analytical Approach to Sampling Estimation of Underwater Tunnels Using Mechanical Profiling Sonars. *Sensors* 2021, 21, 1900. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

Jorge, V.A.M.; Gava, P.D.d.C.; Silva, J.R.B.F.; Mancilha, T.M.; Vieira, W.; Adabo, G.J.; Nascimento, C.L., Jr. VITA1: An Unmanned Underwater Vehicle Prototype for Operation in Underwater Tunnels. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Vancouver, BC, Canada, 15 April–15 May 2021; pp. 1–8. [Google Scholar] [CrossRef]

Karras, G.C.; Bechlioulis, C.P.; Leonetti, M.; Palomeras, N.; Kormushev, P.; Kyriakopoulos, K.J.; Caldwell, D.G. On-line identification of autonomous underwater vehicles through global derivative-free optimization. In *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 3–7 November 2013; pp. 3859–3864. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

Khodayari MH, Balochian S. Modeling and control of autonomous underwater vehicle (AUV) in heading and depth attitude via self-adaptive fuzzy PID controller. *Journal of Marine Science and Technology*. 2015;20(3):559-78. <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0312-7>.

Koenig, N.; Howard, A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Sendai, Japan, 28 September–2 October 2004; Volume 3, pp. 2149–2154. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

Li B, Su T-C. Nonlinear heading control of an autonomous underwater vehicle with internal actuators. *Ocean Engineering*. 2016;125:103-12. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.010>.

Liang X, Wan L, Blake JIR, Shenoi RA, Townsend N. Path following of an underactuated AUV based on fuzzy backstepping sliding mode control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2016;13(3):122. <https://doi.org/10.5772/64065>.

Liu F, Wang Y, Niu W, Ma Z, Liu Y. Hydrodynamic performance analysis and experiments of a hybrid underwater glider with different layout of wings. In: *OCEANS 2014 - TAIPEI*. IEEE; 2014:1-5.

Liu F, Wang Y, Wu Z, Wang S. Motion analysis and trials of the deep sea hybrid underwater glider Petrelli. *China Ocean Engineering*. 2017;31(1):55-62. <https://doi.org/10.1007/s13344-017-0007-4>.

Lu, W.; Liu, D. A Frequency-Limited Adaptive Controller for Underwater Vehicle-Manipulator Systems Under Large Wave Disturbances. In Proceedings of the 2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Changsha, China, 4–8 July 2018; pp. 246–251. [Google Scholar] [CrossRef]

Mai, N.; Ji, Y.; Woo, H.; Tamura, Y.; Yamashita, A.; Hajime, A. Acoustic Image Simulator Based on Active Sonar Model in Underwater Environment. In Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), Honolulu, HI, USA, 26–30 June 2018; pp. 775–780. [Google Scholar]

Manhães, M.M.M.; Scherer, S.A.; Voss, M.; Douat, L.R.; Rauschenbach, T. UUV Simulator: A Gazebo-based package for underwater intervention and multi-robot simulation. In Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, Monterey, CA, USA, 19–23 September 2016; pp. 1–8. [Google Scholar] [CrossRef]

McQueen, C. Orca3. Available online: <https://github.com/clydemcqueen/orca3> (accessed on 12 April 2022).

Meier, L.; Tanskanen, P.; Fraundorfer, F.; Pollefeys, M. PIXHAWK: A system for autonomous flight using onboard computer vision. In Proceedings of the 2011

IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 9–13 May 2011; pp. 2992–2997. [Google Scholar] [CrossRef]

Michel, O. Webots: Professional Mobile Robot Simulation. *J. Adv. Robot. Syst.* 2004, 1, 39–42. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]

Mikkili, S., Panda, A.K. & Prattipati, J. Review of Real-Time Simulator and the Steps Involved for Implementation of a Model from MATLAB/SIMULINK to Real-Time. *J. Inst. Eng. India Ser. B* 96, 179–196 (2015). <https://doi.org/10.1007/s40031-014-0128-6>

Morrison A., Yoerger D. [1993] , Determination of the Hydrodynamic Parameters of an Underwater Vehicle During Small Scale, Nonuniform, 1-Dimensional Translation, IEEE proceedings, 1993

Mousavian SH, Koofigar HR. Identification-Based Robust Motion Control of an AUV: Optimized by particle swarm optimization algorithm. *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* 2017;85(2):331-52. <https://doi.org/10.1007/s10846-016-0401-9>.

Nahon M, [1993], Determination of Vehicle Hydrodynamics Derivatives Using the USAF Datcom, IEEE proceedings, 1993.

Nahon M., [1998] A Simplified Dynamics Model for Autonomous Underwater Vehicle, IEE proceedings, 1998.

Pittelkau, M.E. Rotation Vector in Attitude Estimation. *J. Guid. Control. Dyn.* 2003, 26, 855–860. [Google Scholar] [CrossRef]

Quigley, M.; Gerkey, B.; Conley, K.; Faust, J.; Foote, T.; Leibs, J.; Berger, E.; Wheeler, R.; Ng, A. ROS: An open-source Robot Operating System. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) Workshop on Open Source Software in Robotics, Kobe, Japan, 17 May 2009. [Google Scholar]

Reid S [2001], The design of an Autonomous Underwater Vehicle, Undergraduate Thesis, Faculty of Built Environment and Engineering , Queensland University of Technology, 2001.

Rezazadegan F, Shojaei K, Sheikholeslam F, Chatraei A. A novel approach to 6-DOF adaptive trajectory tracking control of an AUV in the presence of parameter uncertainties. *Ocean Engineering.* 2015;107:246-58. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.040>.

Ridley, P., Fontan, J. y Corke, P. (2002). Submarine Dynamic Modelling. Australian Robotics and Automation Association. En: <https://core.ac.uk/download/pdf/10898542.pdf>

Robot Operating System—ROS, an Open Source Robotics Foundation Software Development Kit. Unified Robot Description Format (URDF). Available online: <https://wiki.ros.org/urdf> (accessed on 12 April 2022).

Rohmer, E.; Singh, S.P.N.; Freese, M. V-REP: A Versatile and Scalable Robot Simulation Framework. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, Japan, 3–7 November 2013; pp. 1321–1326. [Google Scholar] [CrossRef]

Sarhadi P, Noei AR, Khosravi A. Adaptive integral feedback controller for pitch and yaw channels of an AUV with actuator saturations. ISA Transactions. 2016;65:284-95. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.08.002>.

Shen C, Buckham B, Shi Y. Modified C/GMRES Algorithm for fast nonlinear model predictive tracking control of AUVs. IEEE transactions on control systems technology. 2017;25(5):1896-904. <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2628803>.

The Society of Naval Architecture and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body through a Fluid; Technical and Research Bulletin No. 1–5; The Society of Naval Architecture and Marine Engineers: New York, NY, USA, 1950. [Google Scholar]

Tritech International Limited. Gemini 720im Multibeam Sonar. Available online: <https://www.tritech.co.uk/product/gemini-720im> (accessed on 12 April 2022).

Water Linked. DVL A50. Available online: <https://store.waterlinked.com/product/dvl-a50/> (accessed on 12 April 2022).

Wehbe, B.; Krell, M.M. Learning coupled dynamic models of underwater vehicles using support vector regression. In Proceedings of the OCEANS 2017-Aberdeen, Aberdeen, UK, 19–22 June 2017; pp. 1–7. [Google Scholar] [CrossRef]

Weißmann, S.; Pinkall, U. Underwater rigid body dynamics. ACM Trans. Graph. (TOG) 2012, 31, 104. [Google Scholar] [CrossRef]

Wu, C.J. 6-Dof Modelling and Control of a Remotely Operated Vehicle. Ph.D. Thesis, College of Science and Engineering, Flinders University, Adelaide, Australia, 2018. [Google Scholar]

Yashodhar Veeralla, V. (2020). Modeling and Simulation of an Autonomous Underwater Vehicle: MATLAB and Simulink. En <https://bit.ly/2yx0dpl>

Yuan C, Licht S, He H. Formation learning control of multiple autonomous underwater vehicles with heterogeneous nonlinear uncertain dynamics. IEEE

Transactions on Cybernetics.
<https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2752458>.

2018;48(10):2920-34.

Sistemas de control para uso en cuadcópteros y AUVs

Alejandro Molina

Germán Fernández Madarieta

Horacio Simonetti

1. Introducción

Los vehículos submarinos autónomos (AUV por la sigla del inglés Autonomous Underwater Vehicle) basan su navegación en motores eléctricos que proporcionan la movilidad para seguir una trayectoria dada. Las acciones de balanceo, cabeceo, guiñada y empuje se controlan mayoritariamente cambiando los empujes de los rotores utilizando modulación de ancho de pulso (PWM) para dar la salida deseada. El uso de dichos vehículos submarinos no tripulados incluye fotografía, inspección de objetos sumergidos, análisis de variables oceanográficas, mantenimiento de cascos de embarcaciones, estudios de peces y algas y operaciones de búsqueda y rescate, entre otros. En función de los diversos esquemas de control existentes, la búsqueda de configuraciones de control que optimicen los problemas navegación que se presenta para distintos contextos geográficos y operativos, es una tarea que requiere herramientas formales específicas para elegir dichos esquemas.

2. Descripción del Sistema Controlado

Previamente a ver los distintos métodos de control se debe incluir el modelo matemático del sistema controlado, el AUV, las ecuaciones que rigen el movimiento de un cuerpo rígido es necesario definir un sistema de referencia inercial. En este caso se toma como referencia de sistema inercial a la Tierra asumiendo, que la aceleración de un punto sobre la superficie terrestre, debida a la rotación de la misma, puede ser despreciada para el caso de estos vehículos subacuáticos. Esta aproximación es válida, en esta situación, ya que el movimiento de la Tierra afecta poco a los vehículos marinos que se desplazan a baja velocidad, como es el caso de los AUV (Fossen, 1994). Según estas consideraciones se define, el sistema de referencia inercial con origen

en un punto OT solidario a la Tierra, donde el eje X apunta hacia el norte, el eje Y hacia el este y el eje Z hacia el centro de la Tierra.

Normalmente en los vehículos submarinos las velocidades lineales y angulares están asociadas a un sistema de coordenadas móvil situado en el vehículo y sus derivadas temporales se miden con respecto al marco de referencia del cuerpo. Se define así, el sistema de coordenadas $\mathbf{A} = [\mathbf{x}_A, \mathbf{y}_A, \mathbf{z}_A]$ solidario al AUV, con origen en su centro de masa (OA), donde los ejes x_A , y_A y z_A se hacen coincidir con los ejes de inercia del AUV, lo cual facilitará el análisis dinámico. El eje \mathbf{x}_A se toma coincidente con la dirección de avance del AUV, \mathbf{y}_A es ortogonal a \mathbf{x}_A y es positivo hacia estribor en el plano horizontal, mientras que \mathbf{z}_A está orientado en sentido descendente y ortogonal al plano $\mathbf{x}_A \mathbf{y}_A$, como se muestra en la Figura 1.

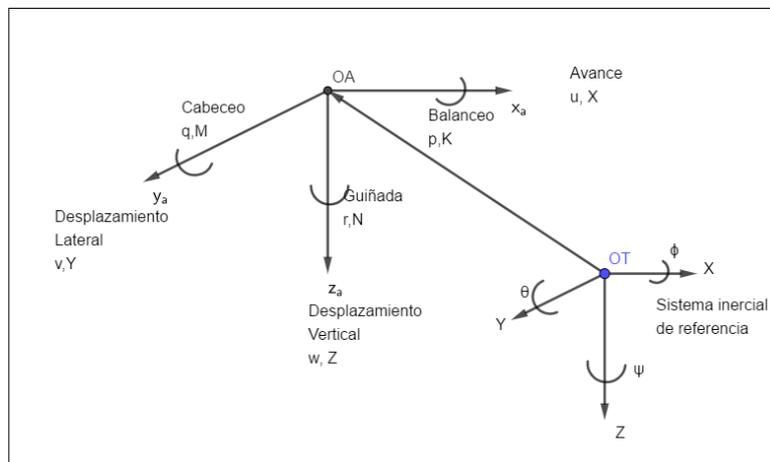


Figura 1

El modelo dinámico de un vehículo submarino se puede escribir en su forma compacta como se muestra a continuación Fossen:

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

donde: $M = M_{RA} + M_A$ es la matriz de inercia incluida la masa añadida

$C(v) = C_{RA} + C_A$ es la matriz de Coriolis, incluyendo la masa añadida.

$D(v)$ la matriz de amortiguamiento, y

$g(\eta)$ representa las fuerzas de restitución

Con $\tau = \tau_{dh} + \tau_m + \tau_P$; donde τ_{dh} y τ_{sh} son los momentos generados por las fuerzas hidrodinámicas, τ_m los momentos generados por los efectos de viento y oleaje y τ_P los torques producidos por los propulsores o cualquier otra fuerza ejercida sobre el AUV.

El vector velocidad es la velocidad generalizada $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ donde u, v, w son las componentes lineales de avance, balanceo, y alabeo, p, q, r son las componentes angulares de roll, pitch y yaw, referidas al marco fijo al cuerpo del vehículo.

Las seis componentes de posición y actitud del AUV, que describen el movimiento del un vehículo marino en los seis grados de libertad 6 *GDL*, referidas al marco inercial, son: $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$, donde η es el vector que permite determinar la posición del vehículo con respecto al sistema fijo a tierra y su orientación con respecto al mismo, dada por los ángulos de *Euler* ϕ, θ, ψ . (Fossen y Pettersen, 2014)).

Siendo $J(\eta)$ la matriz de transformación entre el sistema de referencia inercial y el móvil, las velocidades del AUV con respecto a los ejes inerciales, se expresan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [J(\eta)] \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Resolviendo:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u[c(\psi)c(\theta)] - v[c(\phi)s(\psi) - c(\psi)s(\phi)s(\theta)] + w[s(\phi)s(\psi) + c(\phi)c(\psi)s(\theta)] \\ \dot{y} &= u[c(\theta)s(\psi)] + v[c(\phi)c(\psi) + s(\phi)s(\psi)s(\theta)] - w[s(\phi)c(\psi) - c(\phi)s(\psi)s(\theta)] \\ \dot{z} &= -u[s(\theta)] + v[c(\theta)s(\phi)] + w[c(\phi)c(\theta)] \\ \dot{\phi} &= p + q \operatorname{sen} \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} &= q \cos \phi - r \operatorname{sen} \phi \\ \dot{\psi} &= q \operatorname{sen} \phi \sec \theta + r \cos \phi \sec \theta \end{aligned}$$

Y las fuerzas y momentos a los que se ve sometido el AUV considerando a éste como cuerpo rígido y utilizando la notación utilizada según SNAME (SNAME, 1950).

Para cada variable:

$$K = I_{xx} \dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m [y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - p + ur)]$$

$$X = m$$

$$Y = m$$

$$Z = m$$

$$M = I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr - (\dot{p} + rq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} + (pq - \dot{r})I_{yz} + m [z_g(\dot{u} - vr + p) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]$$

$$N = I_{zz} \dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})qp - (\dot{q} + pr)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (qr - \dot{p})I_{xz} + m [x_g(\dot{v} - p + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)]$$

3. Descripción de los algoritmos de control más utilizados

Hasta hace poco tiempo, desarrollar un vehículo aéreo en escala miniatura y controlado de manera autónoma era un sueño de muchos investigadores, los cuales estaban limitados por las restricciones impuestas por el hardware hasta entonces existente. Lo que hizo posible la construcción de robots aéreos autónomos fue los recientes avances tecnológicos en actuadores y sensores en escala reducida (mems - Micro Electromechanical Systems), así como en el almacenamiento de energía y en el procesamiento de datos.

Además, el desarrollo de sistemas de control para este tipo de vehículos no es trivial, debido principalmente a la dinámica tan compleja inherente en los sistemas aerodinámicos, los cuales son multivariables, subactuados y además presentan diversas características no lineales. Esto significa que las leyes clásicas de control lineales y monovariables pueden tener muy limitada su cuenca de atracción, provocando inestabilidades cuando se opera en condiciones no muy lejanas a las de equilibrio. Por otra parte, las técnicas desarrolladas para robots totalmente actuados tampoco se aplican directamente al caso de sistemas mecánicos no lineales subactuados (Fantoni y Lozano, 1995).

Para aumentar tanto la fiabilidad como las prestaciones de estos sistemas, se suele requerir estrategias de control avanzadas que permitan tener en cuenta, por una parte, la complejidad de estos sistemas, y por otra, las incertidumbres propias de cualquier modelado. Tales requisitos pueden ser posibles utilizando técnicas de modelado no lineal y de teoría de control no lineal, lo que permite alcanzar un alto desempeño en vuelos autónomos (Castillo et al., 2005), y en distintas condiciones de vuelo (vuelo estacionario, vuelo en punto fijo, aterrizaje/despegue, ...). Los objetivos de un sistema de control de vuelo

pueden clasificarse en tres fases, en función de la autonomía que alcance el sistema: Sistema para incrementar la estabilidad (Stability Augmentation Systems): Este tipo de sistemas persigue ayudar al pilotaje del vehículo, estabilizando.

El sistema con un control de bajo nivel. Así se evita que el piloto deba actuar en base al comportamiento dinámico de un sistema, que una vez alejado de cierto punto de equilibrio, deja de ser intuitivo para el razonamiento humano; Sistemas para incrementar el comportamiento (Control Augmentation Systems): Estos sistemas están en un nivel jerárquico superior a los SAS. Así, además de estabilizar al vehículo, estos sistemas deben ser capaces de proporcionar una respuesta con ciertas prestaciones a referencias que del piloto, como por ejemplo, el seguimiento del ángulo de cabeceo; Sistemas de pilotaje automático (Autopilots): Constituyen el nivel de control jerárquicamente superior. Son sistemas de control totalmente automáticos que son capaces de realizar por sí solos ciertos tipos de maniobras, como por ejemplo, el despegue, aterrizaje, o vuelo estacionario a cierta altura.

Existen varias características de los sistemas de control que deben tenerse presente cuando estos se aplican al control de drones. Debe tenerse en cuenta que para lograr un buen funcionamiento de un Sistema de Control cuando este se implementa, se deberá considerar detenidamente el uso de un adecuado filtrado de ruidos, las características de la respuesta en alta frecuencia, el ajuste de los grados de libertad respecto al punto de equilibrio, los efectos de saturación del actuador, el método de ajuste de los parámetros y la implementación computacional. Estas consideraciones requieren el planteo de un modelo que incluya perturbaciones y ruido, llevando el modelo tradicional al que muestra la Figura 3.

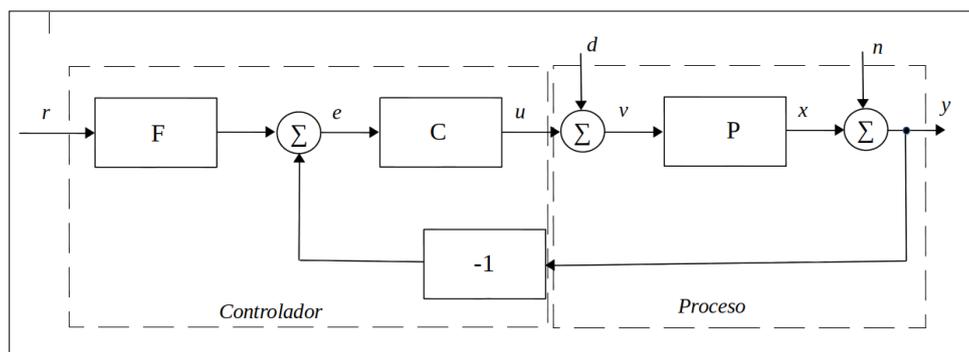


Figura 3

En este nuevo modelo el proceso P se encuentra sometido a perturbaciones: la perturbación de carga d (que representan aquellos efectos que apartan al

proceso de su comportamiento deseado) y el ruido de medición n de la variable de proceso x es la verdadera variable física que se desea controlar, pero el control se basa en la señal medida y que se encuentra corrompida por el ruido n . El controlador se muestra dividido en dos partes: el compensador de realimentación C y el compensador por adelanto (feedforward) F . El proceso es influido por el controlador a través de la variable de control u . El proceso resulta ser así un sistema de tres entradas (u , d , n) y una salida (y). En la Figura 2 se muestra la perturbación de carga actuando a la entrada del proceso, pero en realidad la perturbación puede ingresar al proceso en una multitud de maneras diferentes, adoptándose esta representación para simplificar su descripción.

Haciendo un resumen de las consideraciones generales de diseño para un controlador, podemos identificar a los requerimientos básicos como: Estabilidad, Capacidad de seguir señales de referencia, Reducción de los efectos de perturbaciones de carga, Reducción de los efectos del ruido de medición y Rechazo de variaciones de parámetros del proceso y/o incertezas en el modelo empleado. Dependiendo de la aplicación específica, uno o más de los requerimientos indicados prevalecerán sobre los otros. Este nuevo modelo presenta tres entradas: r , d y n que afectan a tres variables u , x e y que son las que describen el funcionamiento del Sistema. Suponiendo que el sistema sea lineal, existen nueve relaciones expresables como funciones de transferencia entre las variables de entrada y las de salida. Si con X , Y , U , D , N , R representamos las transformadas de Laplace de x , y , u , d , n , r , dejando de lado el argumento complejo s para mayor simpleza, se puede expresar:

$$X = \frac{P}{1+PC} D - \frac{PC}{1+PC} N + \frac{PCF}{1+PC} R$$

$$Y = \frac{P}{1+PC} D + \frac{1}{1+PC} N + \frac{PCF}{1+PC} R$$

$$U = \frac{-P}{1+PC} D - \frac{C}{1+PC} N + \frac{CF}{1+PC} R$$

Observamos que varias de las funciones de transferencia son iguales y que todas las relaciones están expresadas como combinaciones de un conjunto de seis funciones, como planteó Åström (Åström, 2002).

$$\frac{PCF}{1+PC} \quad \frac{PC}{1+PC} \quad \frac{P}{1+PC}$$

$$\frac{CF}{1+PC} \quad \frac{C}{1+PC} \quad \frac{1}{1+PC}$$

Las funciones de transferencia de la primera columna determinan las respuestas de la variable de proceso x y la variable de control u a la variable de comando r . La segunda columna da las mismas señales para el caso de realimentación pura con error, o sea suponiendo $F = 1$. La función $P/(1+PC)$ en la tercera columna define la reacción de la variable de proceso x a una perturbación de carga d , mientras que $C/(1+PC)$ da la respuesta de la señal de control al ruido de medición. El sistema con $F = 1$ se denomina control de realimentación de error puro. En este caso el sistema queda completamente caracterizado por cuatro de funciones de transferencia:

$$\frac{1}{1+PC} \text{ función de sensibilidad}$$

$$\frac{PC}{1+PC} \text{ función de sensibilidad complementaria}$$

$$\frac{P}{1+PC} \text{ función de sensibilidad a la perturbación de carga}$$

$$\frac{C}{1+PC} \text{ función de sensibilidad al ruido}$$

Estas funciones se obtienen a partir de considerar la función de transferencia de lazo cerrado T del sistema y de la variación que sufre el proceso si el proceso P experimenta una pequeña perturbación alrededor del valor nominal de sus parámetros:

$$T = \frac{PC}{1+PC}; dT = \frac{C}{(1+PCN+PCF)^2} dP$$

$$\frac{dT}{T} = \frac{C}{1+PC} \frac{dP}{P} \rightarrow S = \frac{dT/T}{dP/P} = \frac{1}{1+PC}$$

La función de sensibilidad S permite entonces expresar la variación relativa de la función de transferencia de lazo cerrado ante pequeñas variaciones del proceso. A partir de estas ecuaciones, se observa que:

$$S + T = 1$$

Razón por la cual a la función de transferencia de lazo cerrado T se la denomina también *función de sensibilidad complementaria*.

Este análisis es el mismo que si se usa otro tipo de configuración del sistema de Control, como podría ser el representado en la Figura 4, donde podríamos obtener los mismos resultados que antes si fijamos como condición $F=A/C$ -

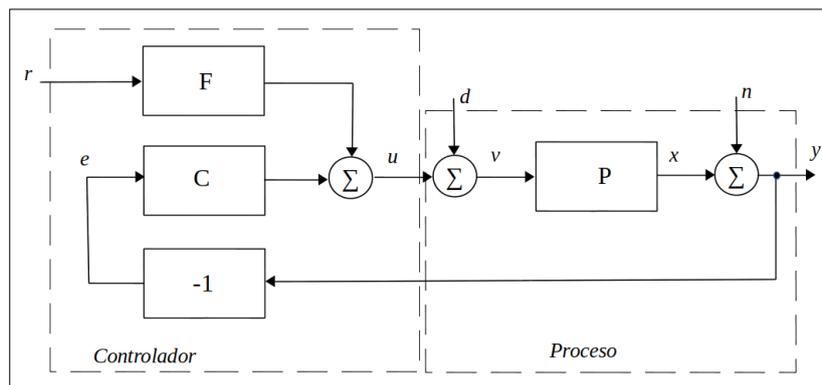


Figura 4

Se han utilizado varios algoritmos de control acorde a la naturaleza de la dinámica de los drones. Cada esquema de control tiene ventajas y desventajas, en una primera aproximación los sistemas de control utilizados podrían dividirse en lineales y no lineales. Para una primera categorización este análisis se puede restringir a distintos sistemas de control dentro de estas categorías.

3.1. Sistema de control Proporcional e Integral más Derivada (PID) (LINEAL)

El controlador PID fue patentado en 1939 por Albert Callender y Allan Stevenson de la firma Imperial Chemicals Limited (Northwich, Inglaterra). El controlador PID representó un enorme avance sobre los métodos de control

automáticos previos. El algoritmo del control PID consta de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor proporcional depende del error actual, el integral depende de los errores pasados y el derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar el proceso por medio de un elemento de control,

3.1.1. Fundamentos del Sistema de Control PID

Dado un sistema cuyas variables se explicitan en el lazo de control de la Figura 5.

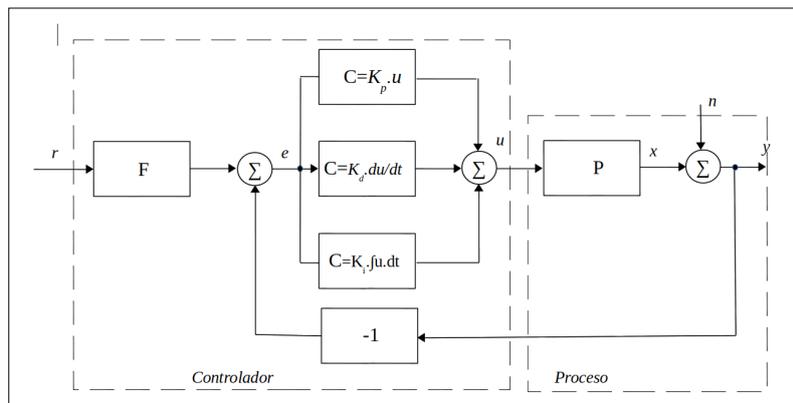


Figura 5

El sistema presenta un comportamiento descrito por la ecuación:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

3.1.2.- Uso de Sistemas de Control PID en UAV

El uso de controles PID en UAV ha sido ampliamente utilizado ante la imposibilidad de contar con valores exactos del modelo controlado, pero no es así ante sistemas bien especificados.

Maflouf (Maalouf, D. et al. 2012) comparó en forma experimental un controlador PID y uno no lineal adaptativo, ambos aplicados en un vehículo ROV. Se analizó el comportamiento para cada uno de estos dos controladores, y luego su robustez frente a algunos cambios de parámetros. Se encontró que el controlador PID tenía mejor desempeño cuando los parámetros del sistema controlado no estaban bien determinados, mientras

que el control no lineal tenía mejor convergencia a una trayectoria bien especificada.

Li (Li, Y et a., 2015) diseñó un sistema de control de seguimiento para el seguimiento de una trayectoria en línea recta con un control PID inteligente, el control de seguimiento de trayectoria 3D se desacopla en una trayectoria 2D plana y en un control de profundidad. Siguiendo la teoría de Lyapunov, el control se diseñó utilizando un algoritmo PID discreto cuyos parámetros obedecen a un ajuste difuso adaptativo. Las pruebas se realizaron en el lago Longfeng y en el mar Amarillo. En las condiciones del mar más difíciles, los errores de seguimiento de la línea recta estuvieron por debajo de 2 m en general, mostrando que el AUV era capaz de compensar la perturbación provocada por la corriente del mar. Se concluyó que el control de guiado PID tiene buena robustez en diferentes entornos submarinos y es capaz de seguir una trayectoria con una precisión aceptable. También demostró que el método de control era independiente del modelo matemático.

Guerrero (Guerrero, J. At al ,2019) diseñó un controlador PID no lineal para el seguimiento de una cualquiera. La combinación de este tipo de control conservó las ventajas de un control robusto y fue fácil de ajustar para aplicaciones reales. Utilizó el concepto de Lyapunov para probar la estabilidad del sistema en el seguimiento de una trayectoria cerrada, el sistema se mostró sólido para el seguimiento de una trayectoria en profundidad y con buena respuesta a cambios dinámica del ángulo de guiñada.

En general los controles PID se desempeñan bien cuando los parámetros del sistema no están bien determinados y combinándolos con otros tipos de control se obtienen muy buenos resultados.

3.2. Sistemas de Control lineal cuadrático gaussiano (LQR/G) (LINEAL)

El control lineal cuadrático gaussiano (LQG) es uno de los métodos fundamentales del control óptimo. Donde se trabaja con sistemas lineales inciertos perturbados por ruido blanco gaussiano aditivo, además la información de estado es incompleta (es decir, no todas las variables de estado se miden y están disponibles) y sometidos a funciones de control cuadráticas. La solución es en estos casos es única y se calcula e implementa fácilmente. Finalmente, el controlador LQG también es fundamental para el control óptimo de los sistemas no lineales perturbados. El controlador LQG es simplemente la combinación de un filtro de Kalman (un estimador lineal cuadrático (LQE)) con un regulador lineal cuadrático (LQR). El principio de superposición garantiza que estos puedan ser diseñados y calculados de

forma independiente. Los sistemas de control LQG se aplican tanto a los sistemas lineales invariantes, como a los sistemas lineales variables en el tiempo.

3.2.1. Fundamentos del Sistemas de Control LQR/G

El diagrama en bloques de un controlador LQG para un cuadcóptero se muestra en la Figura 6.

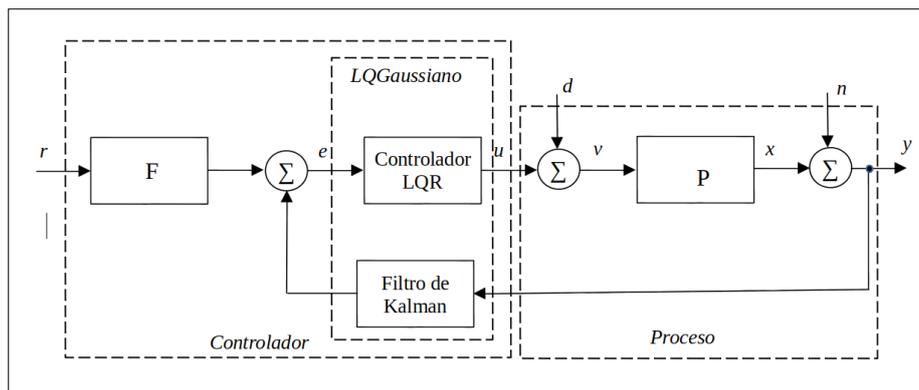


Figura 6

La descripción genérica en términos de un sistema dinámico lineal sería:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + v(t)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + w(t)$$

Donde x representa el vector de las variables de estado del sistema, u el vector de las entradas de control e y el vector de salidas medidas disponibles para la realimentación. Tanto el ruido blanco aditivo del sistema $v(t)$, como ruido de la medición $w(t)$ afectan al sistema.

Teniendo en cuenta que el objetivo es encontrar la los valores de la entrada de control $u(t)$ para cada momento t , este dependerá sólo de las últimas mediciones $y(t')$, para $0 < t' < t$ de modo tal que la siguiente función de costo se minimiza:

$$J = E(x^T(T)Fx(T) + \int_0^T x^T(t)Q(t) + u^T(t)R(t)u(t) dt)$$

$$F \geq 0; Q(t) \geq 0; R(t) > 0$$

Donde E es el valor esperado. T puede ser finito o infinito, pero si tiende a infinito, el primer término de la función de costo J se puede despreciar. Para mantener la función de costo en un valor finito se puede utilizar J/T en lugar de J. El controlador LQG que resuelve el problema planteando por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + L(t)(y(t) - C(t)x(t))$$

$$x(0) = E(x(0))$$

$$u(t) = -K(t)x(t)$$

La matriz $L(t)$ se llama la ganancia de Kalman del filtro de Kalman asociado presente en la primera ecuación. Para cada t el filtro genera estimaciones de $x(t)$ usando las mediciones y entradas anteriores. La ganancia de Kalman $L(t)$ se calcula a partir de las matrices $A(t), C(t)$, las dos matrices $V(t), W(t)$ de los ruidos blancos $v(t)$ y $w(t)$ y finalmente la matriz de los valores $E[x(0)]$ esperados en el origen $t=0$. Estas cinco matrices determinan la ganancia de Kalman a través de la matriz asociada a la ecuación diferencial de Riccati:

$$\dot{P}(t) = A(t)P(t) + P(t)A^T(t) - P(t)C^T(t)W^{-1}(t)C(t)P(t) + V(t)$$

la cual cumple que en el instante inicial:

$$P(0) = E(x(0)x^T(0))$$

La solución para P(t) en $0 < t < T$ permite obtener la ganancia de Kalman como:

$$L(t) = P(t)C^T(t)W^{-1}(t)$$

La realimentación está expresada por la matriz $K(t)$ llamada Matriz de Ganancia de Realimentación, que se obtiene a partir de $A(t), B(t), Q(t), R(t)$ y F aplicando la transformada a la Ecuación de Riccati:

$$-\dot{S}(t) = A^T(t)S(t) + S(t)A(t) - S(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)S(t) + Q(t)$$

$$S(T) = F$$

Donde la solución $S(t)$ para $0 < t < T$ permite obtener la ganancia de realimentación como:

$$K(t) = R^{-1}(t)B^T(t)S(t)$$

Se observa que las expresiones matriciales de las ecuaciones diferenciales de Riccardi son similares, esto se denomina Dualidad. La primera ecuación permite resolver el problema de la estimación cuadrática lineal (LQE) y la segunda resuelve el problema del regulador lineal cuadrático (LQR); dado que el problema es dual ambas ecuaciones resuelven el problema del control cuadrático lineal gaussiano (LQG). Por ello se dice que el problema LQG es separable, ya que se resuelve resolviendo por separado los problemas LQE y LQR.

Cuando $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $Q(t)$, $R(t)$ y las matrices de ruido $V(t)$ y $W(t)$ no dependen de t cuando T tiende a infinito, el controlador LQG se convierte en un sistema dinámico invariante y la segunda ecuación diferencial de Riccardi puede reemplazarse por la ecuación algebraica de Riccardi. Si se plantea el análisis discreto de este problema, se llegaría a la solución en forma similar a la realizada en el análisis continuo.

3.2.3. Sistemas de Control LQR/G en AUV

Du (Du, G. et al., 2011) desarrollo un modelo mediante la integración de dos fuentes de información para mejorar el rendimiento de un sistema de navegación totalmente autónomo basado en el sistema de navegación inercial (LQR más Kalman), esto permitió utilizar al máximo las características dinámicas del vehículo. La navegación asistida por modelo integrado obtuvo una mayor precisión de posicionamiento y redujo la cantidad de cálculos en la navegación en tiempo real.

Wang (Wang, S. et al., 2016) diseñó un controlador LQR con parámetros de optimización mediante el uso del algoritmo genético, basado en un modelo de resistencia longitudinal, combinando el ángulo de cabeceo, de elevación, la energía motriz con la resistencia agregada del AUV como sus indicadores. Comprobó que no solo se redujo el ángulo de inclinación del AUV y el movimiento de elevación, sino también la resistencia causada por el

movimiento de inclinación. También verificó la corrección del modelo de resistencia dinámica y el método de control propuesto

Mohamed (Mohamed, S. et al., 2020) generó un modelo dinámico para un UAV considerando todos los parámetros físicos, las propiedades y geometría de la masa del vehículo, así como las fuerzas y momentos hidrostáticos e hidrodinámicos actuantes. Para ello utilizó un algoritmo de control LQR implementado para controlar completamente 4 grados de libertad de movimiento del vehículo simultáneamente al asignar diferentes valores de empuje a los propulsores del vehículo para lograr un control de estabilización de profundidad, un control del ángulo de dirección, la estabilización de los ángulos de inclinación y balanceo, además de controlar las velocidades lineales y angulares del vehículo en relación a su estructura.

Al igual que con los cuadcópteros, en los UAV este método de control aumenta la precisión en el seguimiento de una trayectoria, en especial combinando el control LQR con filtros de Kalman y modelos no lineales.

3.3. Sistemas de control por Modo deslizante (SMC) (NO LINEAL)

El control en modo deslizante es un algoritmo de control no lineal que funciona aplicando una señal de control discontinua al sistema para forzarlo a seguir una trayectoria prescrita.

3.3.1. Fundamentos de los Sistemas de control por Modo deslizante

El control de modo deslizante (SMC) es un método de control no lineal que altera la dinámica de un sistema no lineal mediante la aplicación de una señal de control discontinua señal (o más exactamente, un conjunto preestablecido de señales de control) que obliga al sistema a "deslizarse" a lo largo de una sección transversal del comportamiento normal del sistema.

Las señales de control siguen reglas de la realimentación que no son una función continua en el tiempo. En cambio, puede cambiar de una estructura continua a otra en función de su posición en el espacio de los estados. Por ello, el control por modo deslizante es un método de control con una estructura variable. Estas estructuras de control están diseñadas para que las trayectorias siempre se muevan hacia una región adyacente con una estructura de control diferente, por lo que la trayectoria final no existirá dentro de la estructura de control, en cambio, se deslizará a lo largo de los límites de las estructuras de control. El movimiento del sistema a medida que se desliza a lo largo de estos límites se denomina *modo deslizante* y el lugar geométrico que contiene dichos límites se llama (*hiper*) *superficie deslizante*.

Si consideramos un sistema dinámico no-lineal descrito por:

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + B(x, t)u(t)$$

con

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

$x(t)$, un vector de estado dimensión n , y

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_{m-1}(t) \\ u_m(t) \end{bmatrix}$$

$u(t)$, es un vector de entradas de dimensión m usado como realimentación. Las funciones f y B se suponen continuas y diferenciables, de forma que garanticen que la solución $x(t)$ exista y sea única.

El diseño de las reglas de control, deben garantizar la estabilidad de la ecuación sobre el origen de modo que siempre que el sistema se re-inicie vuelva rápidamente a él.

El diseño de un control de modo deslizante implica

- Seleccionar una hipersuperficie (es decir, la superficie deslizante) de modo que la trayectoria del sistema muestre un comportamiento deseable cuando se limita a esta.
- Encontrar ganancias de realimentación para que la trayectoria del sistema se cruce y permanezca en la hipersuperficie.

Debido a que las reglas del SMC no son continuas, tienen la capacidad de llevar el sistema a estas trayectorias un tiempo finito, es decir, la estabilidad de la superficie deslizante es mejor que la asintótica. Sin embargo, una vez que

las trayectorias alcanzan la superficie de deslizamiento, el sistema adquiere el carácter del modo de deslizamiento, y por ejemplo, en el origen solo tienen estabilidad asintótica en esta superficie.

Por ello al diseñar un Sistema de Control SMC debe elegirse una función Φ del dominio real, que represente que tan "lejos" está x de la superficie deslizante. De modo que si $\Phi(x)=0$ el estado está en la superficie deslizante, y si $\Phi(x) > 0$ el estado está fuera de la superficie deslizante.

El conjunto de reglas de control, cambia de un estado a otro dependiendo del signo de Φ , de modo que lo lleve en la dirección de $\Phi(x)=0$. Estas trayectorias $x(t)$ se aproximarán hasta la superficie deslizante en un tiempo finito (debido a que las reglas de control no son continuas). Las superficies deslizantes tienen una dimensión $n \times m$ (n cantidad de estados x y m cantidad de señales de entrada u). Así, el conjunto de reglas de control SMC deben asegurar que exista la superficie con $\Phi(x)=0$ y que pueda llegase a esta a través de las trayectorias del sistema, con lo cual este estado debe alcanzarse desde cualquier condición inicial y una vez en él, debe ser capaz de mantenerlo allí. En la Figura 7 se muestra el esquema de este tipo de control.

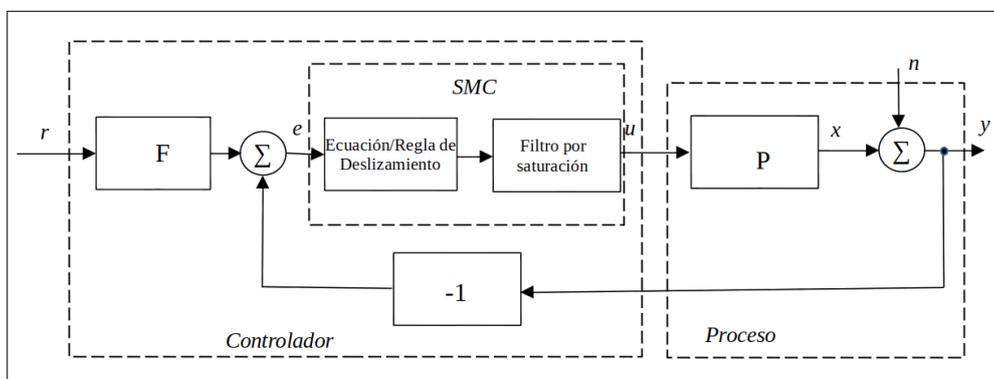


Figura 7

3.3.2. Uso de Sistemas de control SMC en UAV

Hernandez (Hernandez Julian, A. et al., 2016) simularon en control SMC con el agregado de un controlador Integral (I-LOS), que reduce el efecto de las perturbaciones de la superficie del mar. El ajuste de la ganancia proporcional de este controlador tomando la distancia de anticipación como constante. Los resultados que obtuvieron demostraron que esta estrategia de control funcionaba adecuadamente en el seguimiento de trayectorias curvas.

Escobar e Imba (Escobar Ponce e Imba Cruz, 2018) realizaron el diseño, simulación y comparación entre tres controladores, uno basado en las estrategias de control PID y dos en la estrategia de control SMC, de un AUV que realiza el seguimiento de tres trayectorias: cuadrada, circular y circular 3D mientras se aplican perturbaciones marítimas, tipo paso y variación de masa del vehículo. Para medir el rendimiento de cada controlador, graficaron el seguimiento de la trayectoria y se cuantifican mediante índices de error IAE e ISE.

Medina (Medina,V. Et al., 2020) demostró, mediante simulación, que el esquema de guiado y control SMC cumple con los requisitos especificados para el seguimiento de trayectorias rectas, en vehículos marinos afectados por fuerzas externas. El esquema en cascada con el controlador de dirección en modo deslizante asegura precisión, estabilidad y robustez, a pesar de los efectos que provocan las corrientes marinas, las no linealidades y las incertidumbres durante el seguimiento de trayectorias rectas.

Los sistemas de control SMC demostraron funcionar bien en el seguimiento de trayectorias con distintas perturbaciones, mejorando su rendimiento mediante la combinación con otros métodos de control.

3.4. Sistemas de control Backstepping (Integrator) (NO LINEAL)

La técnica Backstepping de control es un algoritmo recursivo que divide al sistema controlador y estabiliza progresivamente cada uno de los subsistemas obtenidos. Su principal ventaja es que el algoritmo converge rápidamente, lo que requiere menos recursos computacionales y puede manejar mejor muchos tipos de perturbaciones.

3.4.1. Principios de los Sistemas de control Backstepping

El enfoque **Backstepping** provee un método recursivo para estabilizar el origen de un sistema solamente mediante realimentación. Si se considera un sistema de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= f_x(x) + g_x(x) z_1 \\
\dot{z}_1 &= f_1(x, z_1) + g_1(x, z_1) z_2 \\
\dot{z}_2 &= f_2(x, z_1, z_2) + g_2(x, z_1, z_2) z_3 \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\dot{z}_i &= f_i(x, z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, z_i) + g_i(x, z_1, z_2, \dots, z_{i-1}, z_i) z_{i+1} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\dot{z}_{k-1} &= f_{k-1}(x, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}) + g_{k-1}(x, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}) z_k \\
\dot{z}_k &= f_k(x, z_1, z_2, \dots, z_k) + g_k(x, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, z_k) u
\end{aligned}$$

Donde, x es real, z_1, \dots, z_k son escalares, u es la entrada escalar al sistema f_x , f_1, \dots, f_k tienen valor 0 en el origen (o sea $f_i(0, 0, \dots, 0) = 0$) y g_1, \dots, g_k son distintos de 0 en el dominio. Si también se asume que el subsistema

$$\dot{x} = f_x(x) + g_x(x) u_x(x)$$

es estable en su origen ($x=0$) para alguna entrada de control $u_x(x)$ donde $u_x(0)=0$. Esto es, que el subsistema x se estabiliza de algún modo y el backstepping extiende su estabilidad al entorno z a su alrededor. Se dice que en el modo backstepping estricto en torno a un subsistema estable x : la entrada de control u tiene su impacto estabilizador en Z_n ; el estado z_n actúa como estabilizador del estado z_{n-1} anterior y este proceso continúa hasta que se llega a que cada estado z_i es estabilizado por el estado z_{i+1} .

El enfoque de backstepping tiende a estabilizar el subsistema x usando z_1 , luego trata de que z_2 llegue a z_1 manteniendo el control para que x permanezca estable. Este procedimiento se sigue hasta llegar a la entrada de control u .

La figura 8 nos muestra un diagrama de este tipo de control.

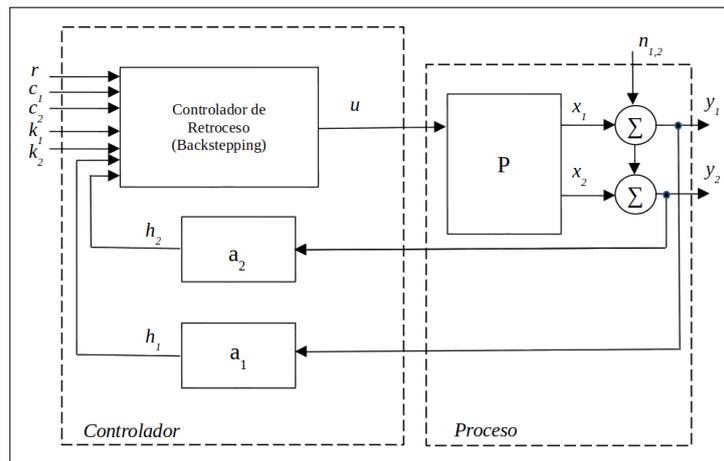


Figura 8

3.4.2. Uso de los Sistemas de control Backstepping en AUV

Zhang y otros (Zhang, M. et al., 2017) propuso un enfoque de control tolerante a fallas de seguimiento utilizando control por Backstepping en AUVs. El se basó en el error de seguimiento para llegar a la trayectoria deseada en presencia de corrientes oceánicas, incertidumbre del modelo, fallas desconocidas del propulsor y limitación de velocidad. Al principio, se construye un tipo de función de Lyapunov diferencial y por partes para lograr el control de seguimiento de la región en el marco de la técnica de retroceso. La estabilidad del sistema se analizó mediante el lema de Barbalat. Finalmente, las simulaciones y experimentos mostraron la efectividad del método propuesto

Liang y otros (Liang, X. et al., 2017) estudiaron el problema del control para el seguimiento de una trayectoria tridimensional en presencia de corrientes oceánicas. Establecieron un modelo de error en el seguimiento de la trayectoria tridimensional basándose en el método de guía virtual. El sistema combinó el cálculo de errores en la velocidad virtual y un control Backstepping, para poder simplificar la entrada de control virtual y evitar el problema de la singularidad que introduce el estado inicial. Teniendo en cuenta las características de la trayectoria tridimensional deseada, se introduce un ángulo de aproximación que garantiza una rápida convergencia del error. Se introduce un término de amortiguación no lineal para compensar los efectos de las incertidumbres dinámicas y las perturbaciones externas. La estabilidad del controlador se probó mediante la teoría de Lyapunov, realizándose simulaciones que indicaron la efectividad y robustez ante las incertidumbres en los parámetros y las perturbaciones externas.

Li y otros (Li, X. Et al., 2020) propuso un controlador robusto que utiliza el enfoque de Backstepping y la estimación de retardo de tiempo (TDE) para el seguimiento de la trayectoria de un AUV. El controlador, al utilizar el enfoque de Backstepping, maneja las perturbaciones de manera efectiva. Para estimar la dinámica no lineal, incluidas las corrientes marinas y las perturbaciones externas, se adopta el método de estimación TDE que utiliza información del sistema anterior y no necesita la descripción completa de la dinámica del vehículo, requiriendo solo de la determinación de la ganancia del control. A través de los resultados de la simulación utilizando el modelo REMUS, se demostró que el controlador tiene un rendimiento de seguimiento preciso y robusto incluso cuando un vehículo se mueve bajo las corrientes marinas y fuerzas perturbadoras externas.

Al igual que con los cuadricópteros este modelo de control responde en forma adecuada y rápida a perturbaciones externas, pero solo presenta robustez cuando se lo combina con otros métodos de control.

3.5. Sistemas de control por algoritmos Adaptativos (NO lineales)

Los algoritmos de control adaptativo tienen como objetivo adaptarse a los cambios de los parámetros de un sistema. Los parámetros pueden ser inciertos o variar con el tiempo.

3.5.1. Fundamentos de los Sistemas de control algoritmos Adaptativos

El control adaptativo se diferencia del control robusto en que no necesita información a priori sobre los límites de variación de los parámetros o de su variación en el tiempo. El control robusto garantiza que si los cambios de los parámetros están dentro de determinados límites, no es necesario cambiar las reglas de control, mientras que el control adaptativo se ocupa del cambio de las reglas de control y de cómo pueden cambiarse a sí mismas. La base del control adaptativo está en la estimación de dichos parámetros, que es una parte del sistema.

Los métodos comunes de estimación incluyen mínimos cuadrados recursivos y descenso de gradiente. Ambos métodos proporcionan leyes de actualización que se utilizan para modificar estimaciones en tiempo real (es decir, a medida que funciona el sistema). La estabilidad de Lyapunov se utiliza para derivar estas leyes de actualización y mostrar criterios de convergencia (típicamente excitación persistente; la relajación de esta condición se estudia en el control adaptativo de aprendizaje concurrente). La proyección y la

normalización se utilizan comúnmente para mejorar la robustez de los algoritmos de estimación.

En general, conviene distinguir entre el Control adaptativo directo y el Control adaptativo realimentado, estos se refieren a la ubicación del estimador. También hay que distinguir entre los Métodos directos, los Métodos indirectos y los Métodos adaptativos híbridos. Los métodos directos son aquellos en los que los parámetros estimados se utilizan en forma directa sobre los controladores. En contraste, los métodos indirectos son aquellos en los que los parámetros estimados se utilizan para calcular los parámetros requeridos del controlador. Los métodos híbridos se basan tanto en la estimación de parámetros como en la modificación directa de las reglas de control.

Hay varias clasificaciones de los sistemas de control adaptativo (pueden variar según distintos autores), se puede usar la siguiente clasificación general como guía:

- Controladores adaptativos duales: basados en la teoría del control dual
 - Controladores duales óptimos: difícil de diseñar
 - Controladores duales subóptimos
- Controladores adaptativos no duales
 - Colocación de polos adaptables
 - Controladores de búsqueda por extremos
 - Control de aprendizaje iterativo
 - Controladores adaptativos según modelo de referencia (MRACs).
Incorpora un modelo de referencia que define el rendimiento deseable de lazo cerrado.
 - MRAC de optimización por gradiente
 - MRAC de estabilidad optimizada
 - Controladores adaptativos por identificación de modelo (MIACs):
realizan la identificación mientras el sistema está en funcionamiento
 - Controladores adaptativos cautelosos: utilizan el SI actual para modificar la ley de control, lo que permite la incertidumbre del SI
 - Controladores adaptativos de certeza: tome el SI actual como el sistema verdadero, no asuma incertidumbre
- Controladores adaptativos no paramétricos
- Controladores adaptativos paramétricos

- Controladores adaptativos de parámetros explícitos
- Controladores adaptativos de parámetros implícitos
- Modelos múltiples: utiliza una gran cantidad de modelos, que se distribuyen en la región de incertidumbre y se basan en las respuestas del sistema controlado y los modelos.

Se elige un modelo para cada instante, que sea más adecuado según alguna métrica.

Un diagrama de un sistema con un control adaptativo directo se ve en la Figura 9.

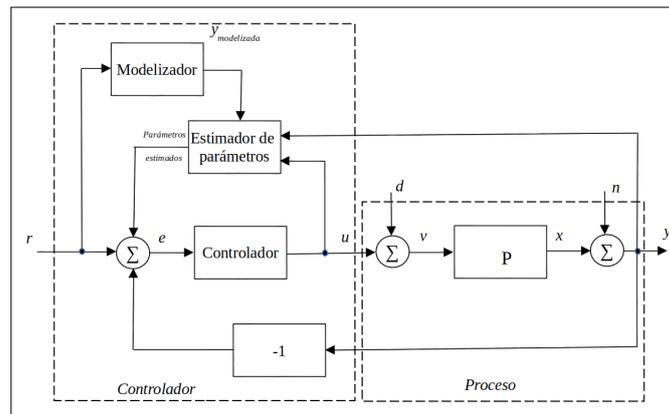


Figura 9

3.5.2. Uso de los Sistemas de control algoritmos Adaptativos en AUV

Spandan y otros (Spandan et al., 2013) diseñaron un controlador para el seguimiento de una trayectoria en forma razonablemente precisa incorporando los efectos de los paradigmas adaptativos dentro de algunos límites conocidos. En este esquema se verificó que el ruido de medición, asociado con los sensores de navegación, degrada el rendimiento del controlador, provocando una desviación sustancial de la trayectoria de referencia. Las pruebas mostraron la necesidad de incorporar alguna técnica de fusión de sensores, para corregir dicho error. El rendimiento del controlador se verificó utilizando los parámetros de un AUV, desarrollado en CSIR-CMERI, Durgapur, India, estimando valores en algunas incertidumbres.

Zain y otros (Zain et al., 2017) propusieron un esquema de control para lograr la respuesta de seguimiento en posición y altitud) de un AUV). El modelo dinámico se supuso inestable, infraactivado y de comportamiento no lineal. El esquema de control utilizó un controlador híbrido compuesto por un control adaptativo de referencia de modelo (MRAC) con controlador de regulación, colocación de polos y seguimiento (RST) y toda la estabilidad del sistema se gestiona mediante las reglas del MIT. El esquema de control se probó

mediante simulaciones por computadora para obtener una posición dada del AUV. La eficiencia del esquema propuesto se comparó con la regla MIT basada en MRAC y su validez se verificó más a fondo con la regla Lyapunov basada en MRAC. Los resultados muestran que el controlador propuesto exhibe robustez, rápida convergencia de errores y un error de estado estacionario cero frente a la existencia de incertidumbres y perturbaciones del modelo.

Cao y Xu (Cao y Xu, 2020) propusieron un algoritmo adaptativo de búsqueda para múltiples -AUV basado en la predicción dinámica de la trayectoria del un objetivo en movimiento. Las simulaciones mostraron que los AUV pueden rodear un objetivo en movimiento cuya trayectoria es desconocida de forma rápida y precisa por el algoritmo en el entorno 3D con obstáculos complejos.

3.6. Sistemas de control mediante algoritmos de Control Robusto (NO LINEAL)

Los algoritmos de control robustos están diseñados para manejar la incertidumbre en los parámetros o perturbaciones del sistema. Esto garantiza un rendimiento dentro de rangos de perturbación aceptables o de parámetros del sistema no modelados. Una limitación importante que se observa con controladores robustos es una capacidad deficiente de seguimiento.

3.6.1. Fundamentos de los Sistemas de control mediante algoritmos de Control Robusto

El control robusto es un enfoque para el diseño de controladores que se ocupa explícitamente de la incertidumbre, están diseñados para funcionar correctamente siempre que se encuentre un conjunto de parámetros inciertos o perturbaciones. Los métodos robustos tienen como objetivo lograr un rendimiento y / o estabilidad robustos en presencia de errores limitados de un modelo.

Los primeros métodos de Bode y otros eran bastante sólidos, pero en las décadas de 1960 y 1970 pruebas más exhaustivas demostraron que carecían de solidez ante la variación de los parámetros, lo que generó investigaciones para mejorarlos. Este fue el comienzo de la teoría del control robusto, que tomó forma en los años ochenta y noventa y sigue vigente en la actualidad. En contraste con el control adaptativo, el control robusto es estático, en lugar de adaptarse a las mediciones de variaciones, el controlador está diseñado para funcionar asumiendo que ciertas variables serán desconocidas pero acotadas.

Se dice, de modo no formal, que un controlador diseñado para un conjunto particular de parámetros es robusto si también funciona bien bajo un conjunto diferente de estos. La realimentación de alta ganancia es un ejemplo simple de un método de control robusto; con una ganancia suficientemente alta, el efecto de cualquier variación de los parámetros será insignificante. Desde la perspectiva de la función de transferencia de lazo cerrado, una alta ganancia de bucle abierto conduce a un rechazo sustancial de perturbaciones ante la incertidumbre de los parámetros del sistema. Pero el principal obstáculo para lograr altas ganancias es la necesidad de mantener la estabilidad de lazo. La configuración del lazo que permite un funcionamiento estable puede ser un desafío técnico.

Los sistemas de control robustos a menudo incorporan topologías avanzadas que incluyen múltiples circuitos de realimentación y lazos directos. Las reglas de control estarían así representadas por funciones de transferencia de alto orden requeridas para lograr simultáneamente el rendimiento de rechazo de perturbaciones deseado con un funcionamiento robusto de lazo cerrado.

Uno de los ejemplos más importantes de una técnica de control robusta es la forma de lazo infinito en H_∞ , desarrollada por Duncan McFarlane y Keith Glover de la Universidad de Cambridge; este método minimiza la sensibilidad de un sistema sobre su espectro de frecuencias, y esto garantiza que el sistema no se desviará mucho de las trayectorias esperadas cuando entren perturbaciones en el sistema.

Otra forma de control robusto es el control de modo deslizante, que es una variación del control por estructura variable. Si bien el control robusto se ha tratado tradicionalmente con enfoques deterministas, en las últimas décadas este enfoque ha sido criticado por ser demasiado rígido para describir la incertidumbre real. El control probabilístico robusto se ha introducido como una alternativa, que interpreta el control robusto dentro de la llamada teoría de optimización de escenarios. Otro ejemplo es la recuperación de transferencia de lazo (LQG / LTR), que se desarrolló para superar problemas de robustez del control lineal-cuadrático-Gaussiano (LQG). Otras técnicas robustas incluyen la teoría de retroalimentación cuantitativa (QFT), control basado en pasividad, control basado en Lyapunov, etc.

Cuando el comportamiento del sistema varía considerablemente respecto de su funcionamiento normal, es posible que deban idearse múltiples reglas de control. Cada regla aborda un modo de comportamiento específico del sistema.

Uno de los desafíos es diseñar un sistema de control que contemple los distintos modos de funcionamiento de un sistema y permita una transición fluida de un modo al siguiente lo más rápido posible. Tal sistema de control

compuesto impulsado por máquina de estado es una extensión de la idea de programación de ganancia donde toda la estrategia de control cambia en base a cambios en el comportamiento del sistema.

En la figura 10 puede verse un diagrama de un sistema de Control Robusto.

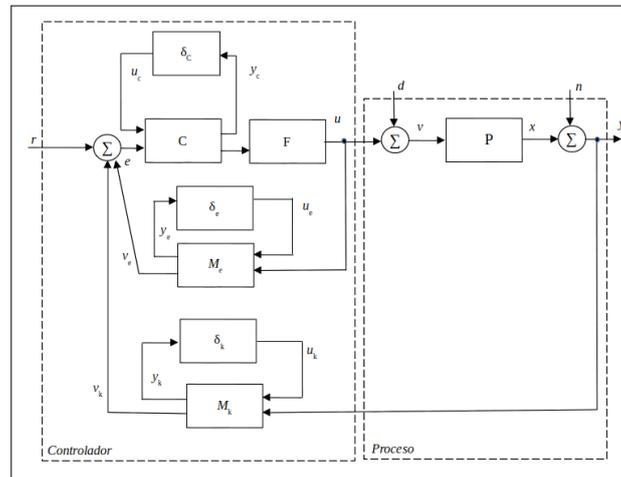


Figura 10

3.6.2. Uso de los Sistemas de Control Robusto en AUV

Kumar (Kumar et al., 2007) propone un nuevo esquema para el control robusto de una trayectoria basado en la estimación directa de la dinámica del sistema de un vehículo submarino. El controlador propuesto pudo funcionar satisfactoriamente bajo una gran incertidumbre. Las perturbaciones del modelo dinámico se cancelan en forma aproximadamente mediante la realimentación de la aceleración. No se requirió del conocimiento de los límites de los parámetros inciertos. Se demostró que solo la matriz de inercia del cuerpo rígido era suficiente para diseñar el controlador. El algoritmo de control es conceptualmente simple y computacionalmente fácil de implementar. La eficacia del controlador se demostró mediante simulaciones.

A. Budiyo (A. Budiyo, 2009) utilizó el método de diagrama de coeficientes (CDM) para el diseño de control robusto de un AUV. El CDM es un enfoque algebraico en el que el polinomio característico y el controlador se sintetizan simultáneamente. En particular, un diagrama de coeficientes (comparable al diagrama de Bode) se utiliza de manera eficaz para transmitir información de diseño pertinente y como medida de compensación entre estabilidad, velocidad de respuesta y robustez. Se emplearon polinomios de Kharitonov para analizar la robustez del controlador frente a incertidumbres paramétricas.

Spandan (Spandan et al., 2013) señaló que la dinámica no lineal de los AUV, sumada a los errores de modelado, las incertidumbres paramétricas y las variaciones de carga útil, plantean un desafío importante hacia el diseño de un control autónomo. La propuesta realizada fue el diseño de un controlador robusto para el seguimiento de una trayectoria razonablemente precisa de un AUV que incorpora los efectos anteriores dentro de límites conocidos. La metodología propuesta se basó en proporcionar la robustez necesaria contra las incertidumbres paramétricas y otras perturbaciones. El rendimiento del controlador se ha verificado mediante simulación numérica con los parámetros de un AUV-150. A partir de los resultados de la simulación, se desprende que la estrategia de control minimiza el error de trayectoria y conduce a un mejor control de la posición del vehículo.

Bejarbaneha y otros (Bejarbaneha et al., 2020) partieron del hecho que los AUV requieren un esquema de control robusto para maniobrar a cualquier punto dado y rastrear un objetivo en movimiento independientemente de las perturbaciones externas. Para ello propusieron dos diseños diferentes de un sistema de control robusto para el modelo no lineal de un AUV. El primero fue un controlador PID que optimiza su ganancia utilizando un novedoso algoritmo híbrido PSO, que combina el algoritmo seno-coseno (SCA) y la distribución Levy Flight (LF). El segundo fue un control de realimentación de estado que utiliza el enfoque de Desigualdad de matriz lineal (LMI) para garantizar la estabilidad de circuito cerrado en el sentido de la teoría de Lyapunov. Los esquemas de control propuestos se aplican a un modelo de variación de parámetros lineales (LPV) para tener en cuenta la naturaleza de variabilidad temporal de los AUV. Se evaluó el rendimiento de estos dos controladores en función del control de profundidad de un AUV en presencia de incertidumbre paramétrica. Los resultados de la simulación demostraron que el PID sintonizado con PSOSCALF propuesto mostró una mayor solidez en presencia de incertidumbres y perturbaciones paramétricas, también tuvo un rendimiento bueno frente a variaciones temporales en comparación con el control de retroalimentación de estado basado en LMI.

3.7. Sistemas de control mediante algoritmos de Control Óptimo (LINEAL y NO LINEAL)

Los algoritmos de optimización están diseñados para minimizar una variable y obtener la mejor función de costo de un conjunto de alternativas. Un caso especial de optimización se conoce como optimización convexa, que es una técnica de optimización matemática que se ocupa de minimizar una variable convexa en un conjunto convexo de variables. Los algoritmos óptimos más

comunes incluyen el problema del control lineal cuadrático gaussiano (LQG), que es una combinación de un filtro de Kalman es decir, un estimador lineal cuadrática (LQE) con un regulador lineal cuadrático (LQR). Una limitación importante de varios algoritmos de optimización es, en general, su escasa solidez.

3.7.1. Fundamentos de los Sistemas de control mediante algoritmos de Control Óptimo

La conducta relevante de varios sistemas puede ser cuantificada por n variables. La identificación de esas variables y la descripción del sistema en términos de ellas es más complicado al construir un modelo matemático del sistema, partiendo de una modelización ya realizada, la conducta del sistema estará descrita por los valores del vector de estado x , cuyas componentes x_i , $i = 1, \dots, n$, son las variables de estado. El sistema evoluciona con el tiempo t , por tanto las variables de estado son funciones de t y estarán gobernadas por n ecuaciones diferenciales de primer orden, que tienen la forma general:

$$\dot{x} = f(t, x, u)$$

La ecuación de estado dependerá del estado del sistema, del tiempo y de las variables de control u , que forman un vector de control m -dimensional y podemos restringir los valores mínimo y máximo de cualquier control que pueda utilizarse. En ese caso, podemos hacer un cambio lineal en la variable para reemplazar u_i por otra variable v_i , definida por

$$u_i = \frac{1}{2}(a_i + b_i) + \frac{1}{2}(a_i - b_i)v_i$$

Donde se verifica para v_i que $-1 \leq v_i \leq 1$, de donde los valores realizables de u deben cumplir esta condición.

La evolución del sistema comienza en $t=t_0$ donde $x(t_0)=x^0$, hacia $x(t_1)=x^1$ donde $t=t_1$, dicho tiempo final puede ser fijo o libre. Por otra puede conocerse el estado final del sistema o puede ser que dicho estado esté sobre una determinada curva o superficie. En general, la condición del estado terminal x^1 , es que esté dentro de un determinado conjunto objetivo F . El ingrediente final de este planteamiento general de un problema de control óptimo, es el coste. La forma más general para el coste que será:

$$J(x, u) = \phi(x(t_1), t_1) + \int_{t_0}^{t_1} F(t, x, u) dt$$

El coste tiene dos partes, la primera llamada coste terminal, que es una penalización respecto al estado final del sistema (solo se aplica cuando el estado final del sistema no está prefijado). La segunda parte depende del estado del sistema a lo largo de la trayectoria de la solución y del tiempo y, más importante, de los valores del control empleados en la solución. Un caso importante y especial, es cuando $F \equiv 1$, y $\phi \equiv 0$, no hay coste terminal. En este caso el coste $J(x, u)$ es igual al tiempo necesario para que el sistema pase del estado inicial al final. Tendremos entonces un problema de tiempo óptimo; que tiene que ser por supuesto, un problema de tiempo terminal no fijo.

El sistema puede evolucionar desde su posición inicial hasta su posición final mediante la aplicación de los controles del conjunto U , mientras que la evolución del estado está gobernada por

$$\dot{x} = f(t, x, u)$$

Si no hay controles apropiados, diremos que el sistema es no controlable desde el estado inicial hasta el conjunto objetivo F , y el problema no tiene solución. El problema del control óptimo consiste en determinar el valor mínimo de $J(x, u)$ o costo óptimo y el valor del vector de control u , para el que se obtiene ese costo mínimo; en este caso u es el control óptimo. Podemos también determinar la solución correspondiente a las ecuaciones de estado, que dan la trayectoria óptima, así como el valor final del tiempo, el tiempo óptimo, y el estado final, si estos no han sido prefijados.

Junto con la clasificación de los problemas de control óptimo en continuos y discretos, también podemos hacer una clasificación según la variable tiempo t , esté o no explícitamente incluida en las ecuaciones de estado, de esta forma tenemos problemas: Autónomos: donde la ecuación de estado no depende explícitamente del tiempo: $\dot{x} = f(x, u)$ y No autónomos: donde la variable t está presente en la ecuación anterior: $\dot{x} = f(t, x, u)$. Por otra parte el conjunto U de los controles admisibles puede ser: No acotado, Acotado o Bang-Bang, según los valores de U estén acotado o no, o varíen solo entre valores discretos (por ejemplo 0 ó 1).

Un ejemplo de cómo sería el diagrama de un sistema con un controlador óptimo se muestra en la Figura 11

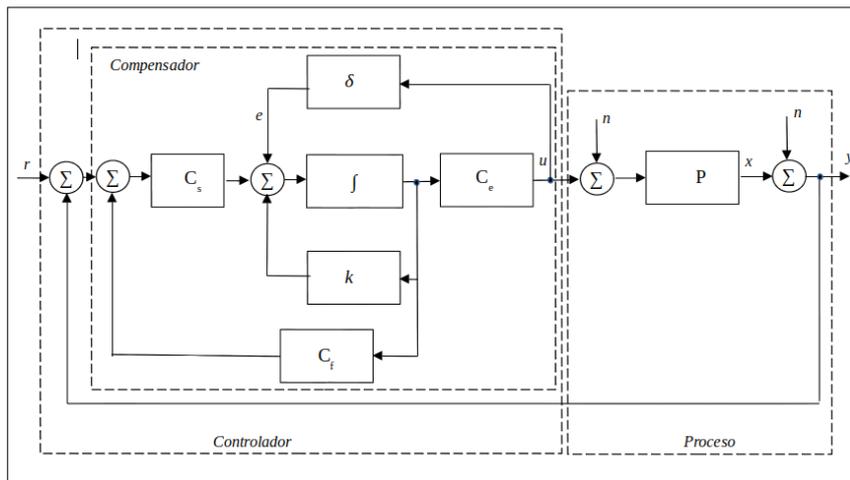


Figura 11

3.7.2. Uso del control mediante algoritmos de Control Óptimo en AUV

Chybaa y otros (Chybaa et al., 2009) trabajaron en una estrategia de control para minimizar el consumo de energía a lo largo de una trayectoria. Utilizaron un algoritmo de tiempo óptimo logrando una estrategia de control implementable y energéticamente eficiente. El algoritmo y la estrategia de control se verificó en un banco de pruebas, encontrando una correlación entre la duración de las trayectorias y la duración óptima. Rout y Subudhi (Rout y Subudhi, 2017) presentaron un nuevo enfoque para el diseño de control de seguimiento de una trayectoria par aun AUV. Partieron del modelo NARMAX del AUV y luego adaptaron sus parámetros utilizando el algoritmo recursivo extendido de cuadrados mínimos. Utilizaron también un controlador adaptativo PID, utilizando parámetros derivados para realizar la tarea de seguimiento de la trayectoria. Los parámetros de ganancia del controlador PID se ajustaron utilizando la técnica de control óptimo inverso, para evitar resolver la ecuación de Hamilton y satisfacer una función de ponderación del error. Se realizaron simulaciones para verificar la eficacia del algoritmo de control propuesto verificando que proporciona un buen rendimiento de seguimiento de una trayectoria, incluso en presencia incertidumbres causadas por corrientes oceánicas.

Li y otros (LI et al., 2020) propusieron un control de tiempo óptimo aproximado modificado (PTOC) basado en un algoritmo RESO y un método control por escalas, para el control de rumbo de un AUV que no posee entradas lineales. Propuso un ADRC modificado simple y práctico para el control de rumbo con no linealidades de entrada, ante zonas muertas no simétricas con parámetros desconocidos se modelaron estas como una combinación de entrada lineal y perturbaciones limitadas El RESO se diseñó para estimarla y compensarla. La influencia de la saturación del actuador se

redujo limitando la señal de control antes de que entre en RESO. Luego, utilizó una estrategia de autoajuste de parámetros para el controlador realimentado con control de ganancia variando por el método de ajustes por pasos. La ganancia de control se tomó como cuadrática con respecto a la velocidad de AUV, los parámetros del controlador de rechazo activo de perturbaciones (ADRC) se ajustaron en función de la velocidad de AUV. Finalmente, se propuso un PTOC modificado, basado en RESO y con una estrategia de actualización para el límite de región lineal, para mejorar el desempeño del algoritmo de control. Se realizaron varios experimentos de simulación, verificando la eficacia del algoritmo propuesto para mejorar el rendimiento.

3.8. Sistemas de control mediante algoritmos de linealización de la realimentación (FL) (No lineal)

Los algoritmos de control de linealización por realimentación (FL) transforman un sistema no lineal en un sistema lineal equivalente mediante cambios de variables. Algunas limitaciones de este método se deben a la pérdida de precisión al linealizar variables y requiere contar con un modelo exacto para su implementación.

3.8.1. Fundamentos de los Sistemas de control mediante algoritmos de FL

La linealización de la realimentación es un enfoque utilizado para controlar sistemas no lineales. El enfoque propone una transformación del sistema no lineal en un sistema lineal equivalente mediante un cambio de variables y una entrada de control adecuada. Se aplica a sistemas no lineales de la forma:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}$$

donde x es un vector de componentes reales, al igual que el vector de entradas u . El objetivo es obtener una entrada de control de la forma

$$u = a(x) + b(x)v$$

Que genera un mapa de entrada-salida lineal entre la nueva entrada y la salida, resultando en un sistema de control lineal que se puede aplicar mediante un circuito de control externo. En el caso de la FL para un sistema de una única entrada y salida (SISO) se obtienen resultados que pueden extenderse a sistemas de entradas y salidas múltiples (MIMO). Si tanto u e y son reales el objetivo es encontrar una transformación de coordenadas $z = T(x)$, que transforme la ecuación del sistema mediante la realimentación ya señalada. Esto lleva a un nuevo mapa de relaciones lineales de entrada y salida entre

cada entrada v y cada salida y . Para garantizar que la transformación del sistema sea una representación equivalente del original, esta debe ser no solo biyectiva (invertible), sino que debe ser infinitamente diferenciable (admite derivadas de cualquier orden) en el origen de coordenadas. Asumiendo que el sistema posee n grados de libertad:

$$\begin{aligned} y &= h(x) \\ \dot{y} &= L_f h(x) \\ \ddot{y} &= L_f^2 h(x) \\ &\vdots \\ y^{(n-1)} &= L_f^{n-1} h(x) \\ y^{(n)} &= L_f^n h(x) + L_g L_f^{n-1} h(x) u \end{aligned}$$

Se desprende de las ecuaciones que la entrada u no contribuye en las primeras $n-1$ derivadas. La transformación de coordenadas $T(x)$ que lleva al sistema a la forma normal toma la forma:

$$z = T(x) = \begin{bmatrix} z_1(x) \\ z_2(x) \\ \vdots \\ z_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ \text{der } y \\ \vdots \\ y^{(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h(x) \end{bmatrix}$$

esta transformación de la trayectoria desde el sistema original de coordenadas x al sistema z debe cumplir la condición de difeomorfismo de x , lo que lleva a un único sistema de coordenadas z , descritas por:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= L_f h(x) = z_2(x) \\ \dot{z}_2 &= L_f^2 h(x) = z_3(x) \\ &\vdots \\ \dot{z}_n &= L_f^n h(x) + L_g L_f^{n-1} h(x) u \end{aligned}$$

Por la cual la regla de control u :

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(x)} (-L_f^n h(x) + v)$$

Obtiene un nuevo mapa de entrada salida que es lineal para $z_1=y$, lo que lleva a la linealización:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ &\vdots \\ \dot{z}_n &= v \end{aligned}$$

la implementación requiere una cascada de n integradores y un lazo exterior de control v, con valor; $v = -Kz$

donde el vector de estado z es la salida y , agregando las n-1 derivadas se obtiene un sistema

$$\dot{z} = Az$$

con

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & \dots & -k_n \end{bmatrix}$$

Eligiendo k de forma apropiada, si fijan los polos del sistema de lazo cerrado linealizado.

En la Figura 12 se presenta un diagrama de estos sistemas:

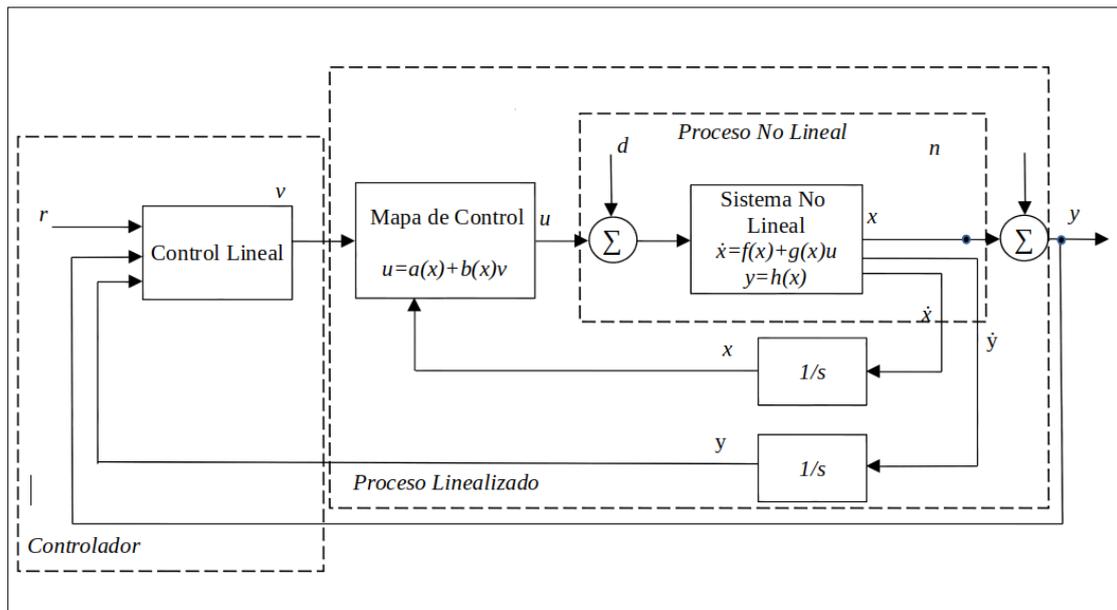


Figura 12

3.8.3 Uso de los Sistemas de control mediante algoritmos de FL en UAV.

Jian y otros (Jian et al., 2012), utilizaron este algoritmo para convertir en un sistema lineal a las ecuaciones de movimiento relativo con perturbaciones en una formación de vehículos submarinos. Primero linealizaron la realimentación y luego diseñaron un algoritmo control óptimo FFOC para el sistema lineal. Las simulaciones numéricas mostraron la efectividad del esquema de control propuesto. El mismo problema del control de una formación de múltiples vehículos submarinos no tripulados utilizando FL basado en observadores descentralizados fue tratado por Moon y Lee (Moon y Lee, 2018) quienes propusieron un modelo no lineal complejo linealizado por retroalimentación. Se supone que cada vehículo en la formación solo utiliza la información respecto a sí mismo y al predecesor inmediato, lo que impone restricciones estructurales sobre las matrices del conjunto. La condición de diseño presenta el problema de las desigualdades de las matrices lineales de dos etapas. El controlador sintetizado demostró ventajas a través de simulaciones numéricas.

Rattanawaorahirunkul y otros (Rattanawaorahirunkul et al., 2020) presentaron una linealización de la realimentación en el diseño de un controlador PID para un AUV, con optimización de enjambre de partículas (PSO). Dado que un AUV es un sistema inherentemente no lineal y altamente sensible a la incertidumbre y las perturbaciones, no es fácil lograr resultados en la velocidad y la precisión en las posiciones deseadas. El desafío planteado fue utilizar un controlador PID con una ganancia que permita lograr una buena la precisión y eficiencia en un la posición y velocidad de un AUV. Se propuso un

controlador PID usando PSO. De la simulación y comparación de otros resultados, se encontró que la FL con un controlador PID basado en PSO, tiene una buena respuesta en el estado estacionario, alta precisión, y rendimiento para el seguimiento dinámico.

3.9. Control mediante sistemas de Control de Lógica Difusa (CLD) (No lineal)

Los sistemas de IA aplican varios enfoques, algunos de inspiración biológica, para controlar un sistema. Los ejemplos incluyen lógica difusa, redes neuronales, aprendizaje automático y algoritmo genético. Por lo general, conllevan una considerable incertidumbre y complejidad matemática. Un sistema de control difuso es un sistema de control basado en lógica difusa, un sistema matemático que analiza los valores analógicos de entrada en términos de variables lógicas que toman valores continuos entre 0 y 1, en contraste con la lógica clásica o digital, que usa valores discretos 1 ó 0. Esta complejidad y la cantidad de recursos computacionales requeridos son limitaciones para su uso. Si bien el control mediante IA no se limita a la lógica difusa y las redes neuronales, son los dos más utilizados.

3.9.1. Fundamentos del Control de Lógica Difusa

El CLD es un tipo de control, usualmente de tipo realimentado, que está basado en reglas. Se orienta al mejoramiento de las características del control "clásico", por ejemplo, incorporando conocimiento que no puede ser descrito en el modelo analítico en que se basa el diseño del algoritmo de control, y que usualmente, en control "clásico", se deja para modos manuales de operación u otros mecanismos de límites o de seguridad. Las aplicaciones de CLD pueden dividirse en dos clases: Aquellas en que el CLD es un control supervisor, es decir, complementa al control realimentado convencional, y aquellas en que el CLD reemplaza al control convencional.

El CLD funciona aplicando un conjunto de reglas que se combina usando lógica difusa. Una regla se activa ("dispara") si se cumplen las condiciones descritas en las premisas de la regla. La evaluación de aquellas condiciones se efectúa en forma difusa, tomando en cuenta la incerteza inherente al conocimiento disponible. Las variables de entrada se interpretan como variables lingüísticas. No es inusual que más de una regla sea gatillada para una misma combinación de variables de entrada, en este caso, la máquina de inferencia en un CLD actúa como un procesador paralelo, es decir, todas las reglas que tienen algún grado de verdad en sus premisas son gatilladas y contribuyen al conjunto difuso de salida. Aplicando la inferencia de Mamdani,

el resultado que arroja cada una de las reglas se combina para dar el resultado del conjunto, que es la unión de las salidas de cada una de las reglas gatilladas.

Los consecuentes de todas las reglas gatilladas se relacionan en el rango [-1,1], combinándose localmente por un OR lógico. Un OR lógico es una conorma T, por ejemplo, la función máximo puntual. Es importante mencionar que se podría usar cualquier conorma T para ello, la función max es la más usada en aplicaciones de tiempo real. La expresión para el conjunto difuso de la variable de salida dada por la inferencia de Mamdani es entonces:

$$\forall b \in U_B: u_{B(CR)}(b) = \max_k (\min(u_{A(k)}(a), m, u_{B(k)}(b)))$$

Existen variados métodos para construir la interfaz de des-difusión de un CLD, como, por ejemplo: centro de gravedad, promedio de los supremos o peso. El método de centro de gravedad es el más utilizado, consiste en obtener la abscisa del centro del área que se forma bajo la función que representa al conjunto difuso combinado de salida. El promedio de los supremos se obtiene considerando únicamente los trazos con valor de pertenencia máximo dentro de todo el conjunto. El método de peso considera el valor (equivalente al grado de certeza) obtenido por cada una de las reglas individuales gatilladas. El centro de gravedad de cada consecuente de esas reglas, que es conocido previamente, (típicamente trapezoides o triángulos) se pondera por el valor de la altura en cada caso, y se obtiene un promedio ponderado de todos los consecuentes representados en el conjunto de salida.

La figura 13 muestra las diferencias entre el proceso de control "clásico" y el CLD,

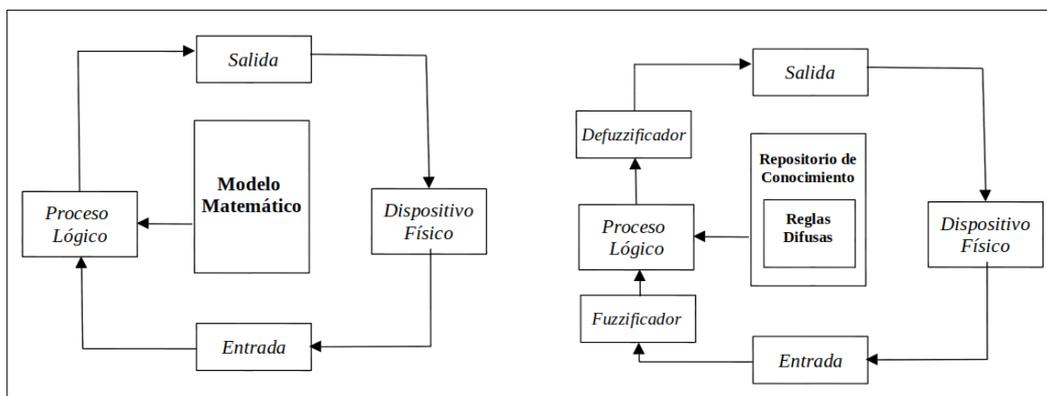


Figura 13

Un CLD aplicado a al control de cuadcópteros se muestra en la figura 14

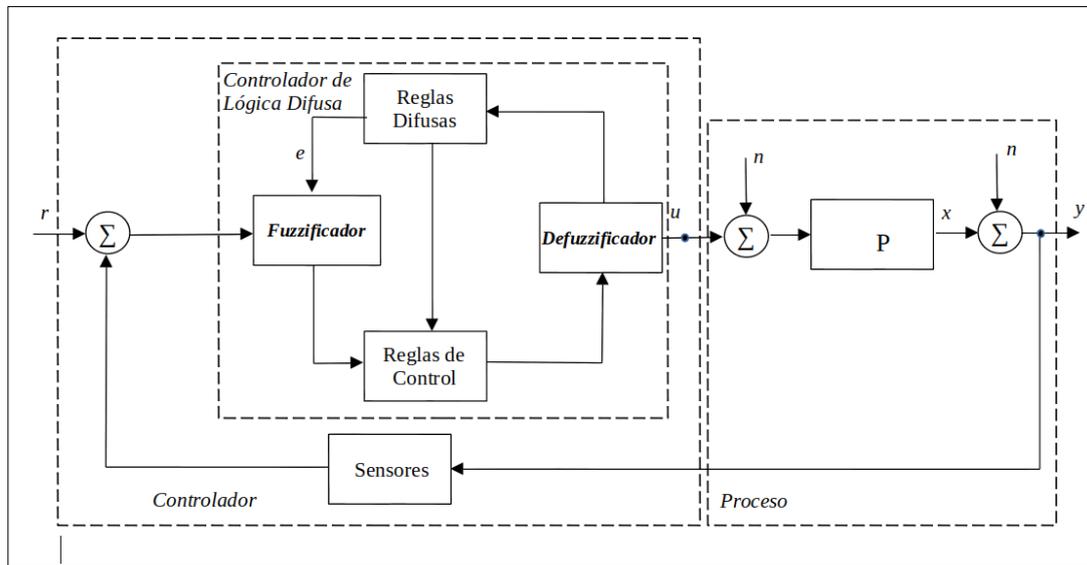


Figura 14

3.9.3. Uso del Control de Lógica Difusa en AUV

Ishaque y otros (Ishaque et al., 2010) describen un esquema que proporciona una forma eficiente de diseñar un control de lógica difusa (FLC) para el vehículo submarino no tripulado (UUV). El método propuesto, se conoce como controlador lógico difuso de entrada única (SIFLC), reduce el FLC convencional de dos entradas (CFLC) a un controlador de salida única de entrada única (SISO). El SIFLC ofrece una reducción significativa en las reglas de inferencias y simplifica el ajuste de los parámetros de control. Prácticamente, puede implementarse mediante una tabla de consulta utilizando un microprocesador de bajo costo. Para verificar su efectividad, el algoritmo de control se simuló usando el Marine Systems Simulator (MSS) en la plataforma Matlab / Simulink®. El resultado indicó que tanto el SIFLC como el CFLC dieron una respuesta idéntica a los mismos conjuntos de entradas. Sin embargo, SIFLC requirió un menor esfuerzo de ajuste y su tiempo de ejecución fue aproximadamente, dos magnitudes menores que el caso del CFLC.

Un trabajo similar realizó Londhe y otros (Londhe et al., 2017) aplicando un esquema robusto de control lógico difuso de entrada única (RSIFLC) para el control de la trayectoria de un sistema autónomo de manipulación de vehículos submarinos (AUVMS). La eficacia del esquema de control propuesto se demostró numéricamente utilizando un sistema manipulador que consta de un vehículo submarino y un manipulador plano en serie giratorio de dos

enlaces (2R). La dinámica del actuador y el sensor del sistema se incorporaron en el modelo dinámico del AUVMS. La regla de control propuesta consistió en: un término de retroalimentación para disponer de información sobre la dinámica no modelada del vector de aceleración deseado conocido y un término representando una perturbación estimada para compensar efectos desconocidos, como perturbaciones externas y la dinámica no modelada. El objetivo principal del algoritmo de control propuesto fue rastrear una trayectoria del vehículo a pesar de la existencia de perturbaciones externas, las incertidumbres del sistema y los ruidos internos asociados con el AUVMS. Para mostrar la eficacia del sistema de control propuesto, se lo comparó con controladores convencionales de control lógico difuso (CFLC), con controladores de modo deslizante (SMC) y controladores PID. Los resultados de la simulación confirmaron que con el esquema propuesto, el AUVMS puede rastrear exitosamente una trayectoria espacial dada y brinda un control de mejor desempeño y además, robusto.

El mismo Londhe con Patre (Londhe y Patre, 2019) diseñaron un control de seguimiento robusto y adaptativo para un modelo no lineal completo de un UUV. El control de seguimiento se logró mediante un esquema de control de modo deslizante difuso adaptativo (AFSMC). Las reglas del control difuso se obtuvieron utilizando la función de energía de Lyapunov para minimizar inconsistencias en la señal de control, que aparecen comúnmente en el control de modo deslizante convencional. Además, la ley de control adaptativa para adaptar el parámetro difuso de un FLC mejora la estabilidad de todo el sistema. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando distintos conjuntos de trayectorias para probar la potencia del AFSMC. El método propuesto no solo eliminó la vibración, sino que también redujo los errores de estado estacionario en el control de seguimiento. También se verificó que la regla de control adaptativo, era eficaz para superar la incertidumbre que posee la dinámica del vehículo.

Bhattacharya y Puttamadappa (Bhattacharya y Puttamadappa, 2021) propusieron un control de profundidad adaptativo para un UUV, donde pusieron énfasis en la lenta respuesta que estos vehículos en comparación con los sistemas aéreos. La técnica de control precisa para AUV se dificulta debido a la no linealidad de los elementos hidrodinámicos. Para ello utilizaron un control de profundidad con un controlador PID y un controlador de lógica difusa tipo 2. El FLC tipo 2 se utilizó para ajustar el controlador PID. Las funcionalidades dinámicas de un AUV se determinaron mediante el uso de ecuaciones diferenciales de movimiento de seis grados de libertad manteniendo la tierra fija como referencia. Para el modelado y análisis del AUV se utilizó MATLAB, verificando que se obtenían resultados precisos para el seguimiento de profundidad.

3.10. Control mediante sistemas de Redes Neuronales (No lineal)

Un controlador neuronal lleva a cabo un control adaptativo, aprendiendo la dinámica del sistema controlado. Este control toma la forma de una red no lineal multicapa cuyos parámetros adaptables son los pesos de conexión entre las neuronas. De alguna manera, la red aprende a controlar el sistema interactuando con él, sin necesidad de un conocimiento a priori de sus características.

3.10.1. Fundamentos del Control mediante sistemas de Redes Neuronales

Las redes neuronales artificiales presentan características semejantes a las del cerebro humano. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas. Entre las ventajas se incluyen: Aprendizaje Adaptativo (capacidad de aprender a realizar tareas basadas en entrenamiento); Auto-organización (capacidad de crear su propia representación de la información mediante el aprendizaje); Tolerancia a fallos (ciertas capacidades de una RN pueden persistir después de sufrir un gran daño); Operación en tiempo real (la operación de las RN pueden ser realizados en paralelo utilizando un hardware especial); y Fácil inserción dentro de la tecnología existente (mediante chips especializados de RN que mejoran las capacidad de ciertas tareas, facilitando su integración en sistemas existentes).

Un esquema de una Rn se muestra en la Figura 15:

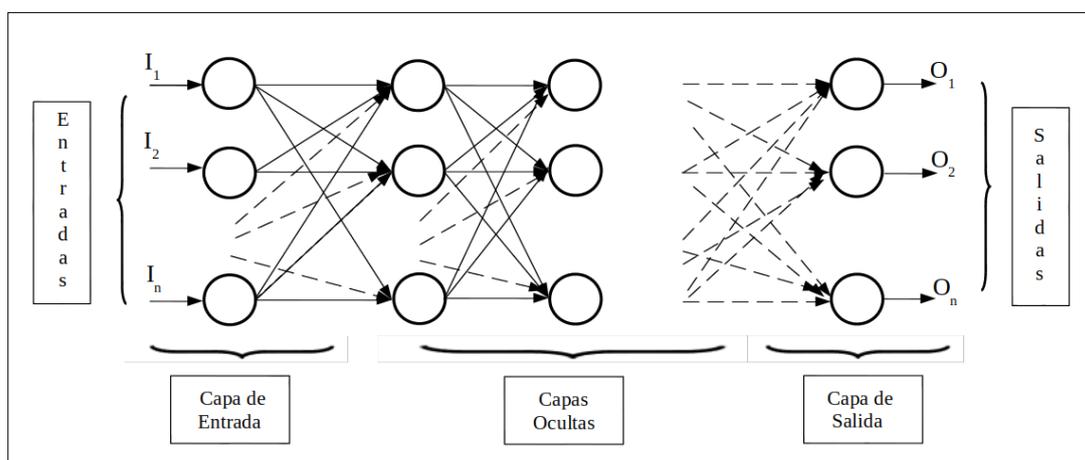


Figura 15

La función de entrada de la RN puede describirse como sigue:

$$\text{input}_i = (in_{i1} \cdot w_{i1}) * (in_{i2} \cdot w_{i2}) * \dots (in_{in} \cdot w_{in})$$

Donde: * representa al operador apropiado (por ejemplo: máximo, sumatoria, productoria, etc.), n al número de entradas a la neurona Ni y wi al peso.

La función activación calcula el estado de actividad de una neurona; transformando la entrada global (menos el umbral, θ_i) en un valor (estado) de activación, cuyo rango normalmente va de (0 a 1) o de (-1 a 1). Esto es así, porque una neurona puede estar totalmente inactiva (0 o -1) o activa (1). Las funciones de activación más comúnmente utilizadas son:

Función lineal:

$$f(x) = \begin{cases} -1 & x \leq -1/a \\ a * x & -1/a < x < 1/a \\ 1 & x \geq 1/a \end{cases}$$

con $x = gin_i - \Theta_i$, y $a > 0$.

Función sigmoidea:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-g x}}, \text{ con } x = gin_i - \Theta_i.$$

Función tangente hiperbólica:

Función de salida, su valor es la salida de la neurona i (outi); por ende, la función de salida determina que valor se transfiere a las neuronas vinculadas. Si la función de activación está por debajo de un umbral determinado, ninguna salida se pasa a la neurona subsiguiente. Normalmente, no cualquier valor es permitido como una entrada para una neurona, por lo tanto, los valores de salida están comprendidos en el rango [0, 1] o [-1, 1]. También pueden ser binarios {0, 1} o {-1, 1}

$$f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}}, \text{ con } x = gin_i - \Theta_i.$$

valor es la salida de la

neurona i (outi); por ende, la función de salida determina que valor se transfiere a las neuronas vinculadas. Si la función de activación está por debajo de un umbral determinado, ninguna salida se pasa a la neurona subsiguiente. Normalmente, no cualquier valor es permitido como una entrada para una neurona, por lo tanto, los valores de salida están comprendidos en el rango [0, 1] o [-1, 1]. También pueden ser binarios {0, 1} o {-1, 1}

Dos de las funciones de salida más comunes son:

Ninguna: la salida es la misma que la entrada. Es también llamada función identidad.

Binaria:

$$\begin{cases} 1 & \text{si } act_i \geq \xi_i \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}, \text{ donde } \xi_i \text{ es el umbral.}$$

Una RN aplicada al control de un sistema controlado se muestra en la figura 16

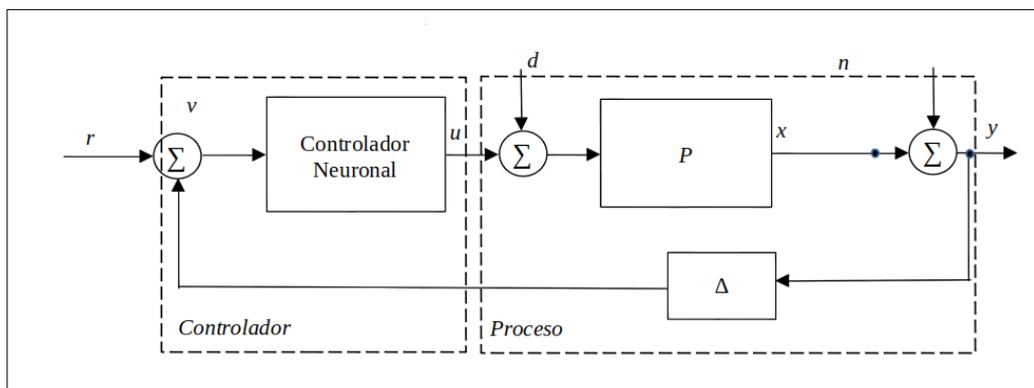


Figura 16

3.10.3. Uso del Control mediante RN en AUV

Distintos trabajos describen el uso de redes neuronales para aplicarlos en vehículos submarinos autónomos, como parte del sistema de control. Amin y otros (Amin et al., 2010) utilizó una red neuronal de perceptrones multicapa diseñada en línea (OMLPNN), que calcula las fuerzas y los momentos en un marco fijo terrestre, de este modo elimina los errores de seguimiento de los AUV cuya dinámica es altamente no lineal y variable en el tiempo. También diseñaron otro OMLPNN para generar un modelo inverso de AUV, que determina la velocidad de la hélice apropiada y los ángulos de las superficies de control que reciben las fuerzas y los momentos en el cuerpo del AUV. El controlador con la red neuronal se basó en el uso del algoritmo de aprendizaje de retropropagación que tiene gran solidez para controlar la dinámica altamente no lineal de AUV. Las arquitecturas de redes neuronales propuestas se utilizaron controlar el banco de pruebas para AUV denominado NPS AUV. Los resultados de la simulación mostraron la eficacia del OMLPNN para hacer frente a la eliminación de los errores de seguimiento de los AUV, ya que tiene una buena capacidad para incorporar la dinámica del sistema.

Pan y otros (Pan et al., 2014) utilizaron controlador de red neuronal eficiente para el control de seguimiento de vehículos submarinos autónomos, sujeto a una dinámica desconocida del vehículo e incertidumbres significativas sobre su posición. El controlador se diseñó utilizando la técnica de retroceso, y a continuación se manejan las dinámicas e incertidumbres desconocidas del vehículo mediante la introducción de una red neuronal con estructura monocapa. La dinámica regresiva que expresa la naturaleza de un comportamiento dinámico altamente no lineal en forma lineal, utilizando los parámetros dinámicos conocidos. La gran ventaja del controlador de seguimiento propuesto es que el algoritmo de aprendizaje de la red neuronal es simple y computacionalmente eficiente. Además, el controlador desarrollado fue capaz de compensar perturbaciones desconocidas delimitadas. Se ha demostrado en las experiencias realizadas que los errores de seguimiento se delimitan en forma uniforme y convergen cerca del origen. La eficacia y eficiencia del controlador propuesto se demostró mediante simulaciones.

Otra tarea en la que se utilizaron las redes neuronales fue la planificación de rutas en tiempo real para vehículos submarinos autónomos. Para ello Ni y otros (Ni et al., 2017) utilizaron una red neuronal bioinspirada (BINN) para tratar este problema dada sus muchas ventajas: no necesita ningún proceso de aprendizaje y su implementación es simple. Sin embargo, existen algunas deficiencias cuando se aplican las BINN a la planificación de rutas para AUV en un entorno desconocido tridimensional (3D), debido a que el entorno es muy grande y un problema que presenta una ruta cuando el tamaño de los obstáculos es mayor que el rango de detección de sensores. Ni propuso un BINN dinámico mejorado, donde el núcleo del BINN y el tamaño del BINN se basan en el rango de detección de los sensores. Entonces el BINN se moverá con el AUV y el procesamiento puede reducirse. Se propuso una trayectoria virtual en la planificación de ruta para garantizar que el AUV pueda moverse en la trayectoria real de forma eficaz y evitar automáticamente obstáculos de gran tamaño. Además, se introdujo el concepto de atractor de objetivos para mejorar la eficiencia informática de las actividades neuronales. Se llevaron a cabo en varios experimentos en entornos submarinos de tres dimensiones y los resultados experimentales mostraron que el método propuesto podía abordar el problema de planificación de rutas en tiempo real para AUV de manera eficiente.

En esa línea de trabajo respecto a la presencia de términos dinámicos inciertos y perturbaciones externas, Duan y otros (Duan et al., 2020) abordaron el seguimiento de la trayectoria para un vehículo subacuático poco accionado, basándose en la teoría de Lyapunov y las propiedades de las redes neuronales, diseñando un controlador neuronal no lineal, donde se adoptan redes

neuronales multicapa para aproximar los términos dinámicos no modelados y las perturbaciones externas. A efectos de limitar los valores de los pesos estimados dentro de ciertos límites predefinidos, se emplearon funciones de proyección suave. Además, se consideró ruidos de medición para simular un escenario de operación realista, mientras que los filtros utilizados buscaron obtener datos más confiables. Mediante un análisis de estabilidad, se demostró que los errores de seguimiento se limitan de manera uniforme y global, proporcionado ejemplos numéricos que demostraron la robustez del controlador en presencia de términos no modelados, perturbaciones y ruidos de medición.

3.11. Sistemas de Control mediante algoritmos Híbridos

Es evidente que incluso los mejores algoritmos lineales o no lineales tienen limitaciones y ningún controlador tiene todas las características óptimas. Distintos investigadores han abordado esto combinando uno o más algoritmos.

3.11.1 Fundamentos de los algoritmos Híbridos

Un algoritmo híbrido es uno que combina dos o más algoritmos que solucionan el mismo problema, ya sea escogiendo uno (a merced de los datos), o cambiando entre ellos sobre el curso del algoritmo. Esto es hecho generalmente para combinar características deseadas de cada uno, a fin de que el algoritmo global sea mejor que los componentes individuales. "Algoritmo híbrido" no se refiere a combinar algoritmos para resolver un problema—muchos algoritmos son las combinaciones de pedazos más simples—pero si combinar algoritmos que resuelven el mismo problema y que difieren en características particulares como el tiempo de ejecución para un tamaño de entrada dado.

3.11.2 Uso de algoritmos Híbridos en AUV

El problema del control de seguimiento de la trayectoria de un robot submarino autónomo en un espacio tridimensional es que no se satisface la condición necesaria de Brockett para la estabilización de la realimentación y no existe una regla de control invariante que haga que haga llegar a un equilibrio específico del sistema en forma asintóticamente estable. La incertidumbre de los parámetros hidrodinámicos, junto con la dinámica no lineal del vehículo submarino, hace que el control de navegación y seguimiento sea una tarea difícil. Mohan y Asokan (Mohan y Asokan, 2010)

propusieron un sistema de control híbrido combinando un control de modo deslizante (SMC) y el método de control clásico PID para reducir los errores de seguimiento que surgen debido a las perturbaciones, así como las variaciones en la flotabilidad. Un planificador de trayectorias calcula las velocidades lineales y angulares, las orientaciones del vehículo correspondientes a una trayectoria inercial 3-D dada y produce una trayectoria factible. Esta trayectoria se utiliza para calcular las señales de control para las tres entradas disponibles del controlador híbrido. Se utiliza un controlador de supervisión para cambiar entre el control SMC y PID según una regla de conmutación predefinida. Los parámetros de la función de conmutación se optimizaron utilizando técnicas de Taguchi. La eficacia y el rendimiento del controlador propuesto se investigó comparándolo numéricamente con el SMC clásico y los sistemas de control lineal tradicionales en presencia de perturbaciones. Las simulaciones utilizaron un conjunto completo de ecuaciones de movimiento no lineales que arrojaron una respuesta del controlador con menos error de seguimiento.

Deng y otros (Deng et al., 2014) desarrollaron un vehículo autónomo y operado a distancia (ARV), que tiene las características de un vehículo submarino autónomo (AUV) y un vehículo submarino operado a distancia (ROV). Utilizaron controlador Fuzzy-PID diseñado para el control de movimiento, profundidad y dirección. El controlador sintetiza la ventaja del control difuso y el control PID, utiliza las reglas difusas para ajustar en línea los parámetros del controlador PID y logra un mejor efecto de control. El cable convencional del ROV se reemplaza por un cable de fibra óptica, que lo hace disponible para video en tiempo real de gran ancho de banda, telemetría de datos y teleoperación de alta calidad. Además, con la ayuda de la operación remota manual en tiempo real y el sonar de alcance, resuelve el problema conflictivo del AUV, para que pueda adaptarse al entorno marino real y satisfacer las necesidades de misiones desconocidas. Los experimentos realizados fueron exitosos.

Wang y otros (Vang et al., 2016) diseñaron un vehículo submarino biomimético (BUV) propulsado por aletas ondulantes inspirado en la sepia, que puede realizar movimientos flexibles mediante propulsión ondulatoria en espacios estrechos. El control de rumbo híbrido combinó un sistema de control para el rechazo activo de perturbaciones (ADRC) y un sistema de lógica difusa para el control de rumbo. Los resultados experimentales demostraron la viabilidad y eficacia del mecanismo y sistema de control.

Un método para reducir la influencia de perturbaciones externas desconocidas, los efectos de acoplamiento interno y las incertidumbres del modelo, utilizando un observador de perturbaciones modificado fue propuesto por Li y otros (Li et. al., 2019) utilizando un controlador de coordenadas híbrido basado en una estrategia con un nuevo observador de

perturbaciones no lineal para sistemas autónomos. El algoritmo una solución redundante que se utiliza a menudo para obtener la articulación entre la trayectoria deseada el movimiento del vehículo. Sin embargo, debido a los errores de calibración, los errores de montaje y los errores numéricos, estas trayectorias pueden no llevar a un punto deseado con precisión. La estrategia híbrida se probó mediante simulaciones numéricas basadas en un UVMS para verificar la efectividad del controlador de coordenadas propuesto y la estrategia híbrida. Durante las simulaciones, se introdujeron perturbaciones aleatorias en el sistema, pero el controlador mantuvo su característica robusta en comparación con otros controladores. También se llevaron a cabo experimentos que comprobaron un rendimiento aceptable.

Cai y otros (Cai et al., 2020) utilizaron sistema de manipulación de vehículos submarinos de accionamiento híbrido (HD-UVMS) para capturar productos en el fondo marino. El propósito del sistema de propulsión híbrido propuesto fue mejorar la capacidad de navegación del HD-UVMS mediante la mejora de la estabilidad de su mecanismo de ajuste a través de dos propulsores de aleta larga únicos. El modo de control de los propulsores y propulsores de aletas largas se basa en un método de control de lógica difusa. Se utilizó un sistema de visión para permitir que el HD-UVMS se acerque gradualmente a los productos marinos con la ayuda de la visión monocular y los capture con la ayuda de la visión binocular. El sistema combina el sistema de visión con lógica difusa lo que fue probado experimentalmente verificando que el sistema propuesto es práctico y válido.

4. Comparación de Algoritmos

La Tabla 1 compara los anteriores algoritmos aplicados al control de drones y UAVs, aunque debe señalarse que el rendimiento de un algoritmo particular depende de tantos factores que no pueden modelarse. La tabla que se presenta a continuación sirve como una guía aproximada según surge del análisis realizado previamente y del conocimiento teórico.

Algoritmo de Control	Linealidad	Ventajas	Desventajas
Proporcional e Integral mas Derivada (PID)	LINEAL	Simple, Tolera Ruido, Permite Ajuste Manual,.	Poco adaptable, No rechaza perturbaciones, Requiere un modelo conocido, Mucho Consumo de Energía .
Lineal cuadrático gaussiano (LQR/G)	LINEAL	Adaptable, Optimizable, Rechaza Perturbaciones	Poco robusto, No inteligente, Requiere un modelo conocido, Poco preciso, Mucho Consumo de Energía .
Modo deslizante (SMC)	NO LINEAL	Adaptable, Buen seguimiento, Rápida Convergencia, Preciso, Rechaza Perturbaciones, Requiere poca energía	No inteligente, No Permite Ajuste Manual, No tolera Ruido.
Backstepping	NO LINEAL	Adaptable Buen seguimiento, Rechaza Perturbaciones,	Poco robusto, No inteligente, No intelige, Poca Convergencia, Complejo, No Permite Ajuste Manual. Mucho Consumo de Energía
Algoritmos Adaptativos	NO LINEAL	Adaptable, Tolera Ruido, Rechaza Perturbaciones	No inteligente, Requiere un modelo conocido Mucho Consumo de Energía
Algoritmos de Control Robusto	NO LINEAL	Robusto, Tolera Ruido, Rechaza Perturbaciones	No inteligente, Poca Convergencia, Mucho Consumo de Energía
Algoritmos de Control Óptimo	LINEAL / NO LINEAL	Robusto, Adaptable, Rápida Convergencia, Preciso,	Requiere un modelo conocido Mucho Consumo de Energía
Algoritmos de linealización de la realimentación (FBL)	NO LINEAL	Buen seguimiento, Rápida Convergencia, Preciso,	No inteligente, No Permite Ajuste Manual. Mucho Consumo de Energía
Lógica Difusa (CLD)	NO LINEAL	Inteligente	No tolera Ruido, Requiere un modelo conocido Mucho Consumo de Energía
Redes Neuronales	NO LINEAL	Adaptable, Inteligente, No Requiere un modelo conocido	Complejo, No Permite Ajuste Manual, No tolera Ruido Mucho Consumo de Energía
Algoritmos Híbridos	LINEAL / NO LINEAL	Adaptable, Inteligente, No Requiere un modelo conocido	No Permite Ajuste Manual. No tolera Ruido Mucho Consumo de Energía

Tabla 1. Características de los algoritmos

A pesar de la poca precisión en la determinación de las características de los algoritmos, puede construir una tabla que señalen en forma "gruesa" en qué forma responde cada algoritmo a determinadas características, por ejemplo tomando valores: 1= Buena ,0 = indiferente y -1= Mala.

Esto permite construir la siguiente Tabla.2

Algoritmo de Control	Características											
	Robustez	Adaptabilidad	Inteligencia	Seguimiento	Convergencia	Precisión	Simpleza	Perturbaciones	Independencia del Modelo	Ajuste Manual	Tolerancia al Ruido	Consumo de Energía
Proporcional e Integral mas Derivada (PID)	0	-1	0	0	0	0	1	-1	-1	1	1	-1
Lineal cuadrático gaussiano (LQR/G)	-1	1	-1	0	0	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
Modo deslizante (SMC)	0	1	-1	1	1	1	0	1	0	-1	-1	0
Backstepping	-1	1	-1	1	-1	0	-1	1	0	-1	-1	-1
Algoritmos Adaptativos	0	1	-1	0	0	0	0	1	-1	0	1	-1
Algoritmos de Control Robusto	1	1	-1	0	-1	0	0	1	0	0	1	-1
Algoritmos de Control Optimo	1	1	0	0	1	1	0	0	-1	0	0	-1
Algoritmos de linealización de la realimentación (FBL)	0	0	-1	1	1	1	0	0	0	-1	0	-1
Lógica Difusa (CLD)	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1
Redes Neuronales	0	1	1	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1

Tabla 2. Desempeño de los algoritmos

A partir de esta última tabla, se propone un índice de aplicabilidad individual (IAI), que permita evaluar el desempeño del Algoritmo de Control para una dada aplicación. El índice se obtiene mediante la siguiente fórmula

$$IAI = \sum^{NC}_1 (IC_i) / NC$$

Con:

NC = Cantidad de características requeridas

IC = índice de características {1= Buena ,0 = indiferente,-1=Mala}

Este índice retornará un valor entre 1 y -1 señalando que el algoritmo elegido, para las características deseadas tendrá un buen desempeño si el valor obtenido se aproxima a 1 o un una desempeño si se aproxima a -1.

Con este índice también se podría evaluar la utilización conjunta de dos o más algoritmos, mediante un índice de aplicabilidad conjunta (IAC), que se obtiene de:

$$IAC = \sum^{NA}_1 (IC_i) / NA$$

Con: NA= Número de algoritmos a utilizar.

5. Discusión y Conclusiones

La revisión realizada y el método de evaluación de algoritmos para un determinado uso permiten disponer de herramientas de análisis para futuros trabajos que se pueden realizar para el control de cuadricópteros o UAV. Como se desprende de esta revisión, ningún algoritmo posee todas las características frente al total de los problemas que se debe enfrentar al comenzar el diseño de un sistema de control. También se desprende de los trabajos analizados que se obtiene un mejor rendimiento al combinar distintos algoritmos que aporten la mejor combinación de las características deseadas, tales como: robustez, adaptabilidad, optimalidad, simplicidad, capacidad de rastreo, respuesta rápida y rechazo de perturbaciones, entre otros. Sin embargo, esto no garantiza un buen rendimiento general; debiendo llegar a un compromiso sobre cuales características serían las más apropiadas, para una aplicación dada. Si bien no existe consenso sobre que modelo daría el mejor rendimiento general, el método de evaluación a priori propuesto constituye una herramienta útil en la selección de una combinación de algoritmos de control.

- Huo, X., Huo, M. and Karimi, H.R. (2014) Attitude Stabilization Control of a Quadrotor UAV by Using Backstepping Approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-9.
- Mahony, R., Kumar, V. and Corke, P. (2012) Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor. *Robotics Automation Magazine*, 19, 20-32. <http://dx.doi.org/10.1109/MRA.2012.2206474>
- Lee, B.-Y., Lee, H.-I. and Tahk, M.-J. (2013) Analysis of Adaptive Control Using On-Line Neural Networks for a Quadrotor UAV. *13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 20-23 October 2013, 1840-1844.
- Bouabdallah, S. (2007) Design and Control of Quadrotors with Application to Autonomous Flying. Ph.D. Dissertation, Lausanne Polytechnic University, Lausanne.
- John, S. (2013) Artificial Intelligent-Based Feedforward Optimized PID Wheel Slip Controller. *AFRICON*, 12 September 2013, Pointe-Aux-Piments, 1-6.
- Lee, K.U., Kim, H.S., Park, J.-B. and Choi, Y.-H. (2012) Hovering Control of a Quadrotor. *12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 17-21 October 2012, 162-167.
- Li, J. and Li, Y. (2011) Dynamic Analysis and PID Control for a Quadrotor. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 7-10 August 2011, 573-578.
- Bouabdallah, S., Noth, A. and Siegwart, R. (2004) PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, Vol. 3, 28 September-2 October 2004, 2451-2456.
- Cowling, I.D., Yakimenko, O.A., Whidborne, J.F. and Cooke, A.K. (2007) A Prototype of an Autonomous Controller for a Quadrotor UAV. *European Control Conference*, July 2007, Kos, 1-8.
- Minh, L.D. and Ha, C. (2010) Modeling and Control of Quadrotor MAV Using Vision-Based Measurement. *International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 13-15 October 2010, 70-75.
- Xu, R. and Ozguner, U. (2006) Sliding Mode Control of a Quadrotor Helicopter. *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, 13-15 December 2006, 4957-4962.

- Runcharoon, K. and Srichatrapimuk, V. (2013) Sliding Mode Control of Quadrotor. Proceedings of the 2013 International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAEECE), Konya, 9-11 May 2013, 552-557.
- Madani, T. and Benallegue, A. (2006) Backstepping Control for a Quadrotor Helicopter. Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, 9-15 October 2006, 3255-3260.
- Fang, Z. and Gao, W. (2011) Adaptive Integral Backstepping Control of a Micro-Quadrotor. Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Harbin, 25-28 July 2011, 910-915.
- Diao, C., Xian, B., Yin, Q., Zeng, W., Li, H. and Yang, Y. (2011) A Nonlinear Adaptive Control Approach for Quadrotor UAVs. Proceedings of the 8th Asian Control Conference (ASCC), Kaohsiung, 15-18 May 2011, 223-228.
- Palunko, I. and Fierro, R. (2011) Adaptive Control of a Quadrotor with Dynamic Changes in the Center of Gravity. Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, 28 August-2 September 2011, 2626-2631.
- De Monte, P. and Lohmann, B. (2013) Position Trajectory Tracking of a Quadrotor Helicopter Based on L1 Adaptive Control. Proceedings of the 2013 European Control Conference (ECC), Zurich, 17-19 July 2013, 3346-3353.
- Bai, Y., Liu, H., Shi, Z. and Zhong, Y. (2012) Robust Control of Quadrotor Unmanned Air Vehicles. Proceedings of the 31st Chinese Control Conference (CCC), Hefei, 25-27 July 2012, 4462-4467.
- Tony, C. and Mackunis, W. (2012) Robust Attitude Tracking Control of a Quadrotor Helicopter in the Presence of Uncertainty. Proceedings of the IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC), Maui, 10-13 December 2012, 937-942.
- Satici, A., Poonawala, H. and Spong, M. (2013) Robust Optimal Control of Quadrotor UAVs. IEEE Access, 1, 79-93. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260794>
- Falkenberg, O., Witt, J., Pilz, U., Weltin, U. and Werner, H. (2012) Model Identification and H₁ Attitude Control for Quadrotor MAVs. Intelligent Robotics and Applications, 460-471.
- Raffo, G.V., Ortega, M.G. and Rubio, F.R. (2010) An Integral Predictive/Nonlinear Control Structure for a Quadrotor Helicopter. Automatica, 46, 29-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2009.10.018>
- Roza, A. and Maggiore, M. (2012) Path Following Controller for a Quadrotor Helicopter. Proceedings of the American Control Conference (ACC), Montreal, 27-29 June 2012, 4655-4660. <http://dx.doi.org/10.1109/ACC.2012.6315061>

Lee, D., Kim, H.J. and Sastry, S. (2009) Feedback Linearization vs. Adaptive Sliding Mode Control for a Quadrotor Helicopter. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 7, 419-428. <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-009-0311-8>

Santos, M., Lopez, V. and Morata, F. (2010) Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor. *Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE)*, Hangzhou, 15-16 November 2010, 141-146.

Nicol, C., Macnab, C.J.B. and Ramirez-Serrano, A. (2008) Robust Neural Network Control of a Quadrotor Helicopter. *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, 4-7 May 2008, 1233-1237.

Dierks, T. and Jagannathan, S. (2010) Output Feedback Control of a Quadrotor UAV Using Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 21, 50-66. <http://dx.doi.org/10.1109/TNN.2009.2034145>

Boudjedir, H., Yacef, F., Bouhali, O. and Rizoug, N. (2012) Adaptive Neural Network for a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal in Foundations of Computer Science and Technology*, 2, 1-13. <http://dx.doi.org/10.5121/ijfcst.2012.2401>

Zeghlache, S., Saigaa, D., Kara, K., Harrag, A. and Bouguerra, A. (2012) Backstepping Sliding Mode Controller Improved with Fuzzy Logic: Application to the Quadrotor Helicopter. *Archives of Control Sciences*, 22, 315-342.

Benallegue, A., Mokhtari, A. and Fridman, L. (2006) Feedback Linearization and High Order Sliding Mode Observer for a Quadrotor UAV. *Proceedings of the International Workshop on Variable Structure Systems*, Alghero, 5-7 June 2006, 365-372.

Madani, T. and Benallegue, A. (2008) Adaptive Control via Backstepping Technique and Neural Networks of a Quadrotor Helicopter. *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Seoul, July 6-11 2008, 6513-6518.

Cetinsoy, E., Dikyar, S., Hancer, C., Oner, K.T., Sirimoglu, E., Unel, M. and Aksit, M.F. (2012) Design and Construction of a Novel Quad Tilt-Wing UAV. *Mechatronics*, 22, 723-745.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.03.003>

Ryll, M., Bulthoff, H. and Giordano, P. (2012) Modeling and Control of a Quadrotor UAV with Tilting Propellers. *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Saint Paul, 14-18 May 2012, 4606-4613.

Senkul, F. and Altug, E. (2013) Modeling and Control of a Novel Tilt–Roll Rotor Quadrotor UAV. Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, 28-31 May 2013, 1071-1076.

K.J. Åström: (2002) Control System Design - Lecture Notes for ME155. California at Santa Barbara.

Houari, A., Bachir, I., Krachai Mohamed, D. and Kara Mohamed, M. (2020). PID vs LQR controller for tilt rotor airplane, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). Vol. 10, No. 6.

Maalouf, D., Tamanaja, I., Campos, E., Chemori, A., Creuze, V., Torres, J. And Lozano, R. (2012) From PID to Nonlinear Adaptive Depth-Control of a Tethered Autonomous Underwater Vehicle. In IEEE/RSJ IROS'12, Algarve, Portugal

Li, Y., Yanqing, J., Wang, L., Cao, J. & Zhang, G. (2015). Intelligent PID guidance control for AUV path tracking. Journal of Central South University. 22. 3440-3449. 10.1007/s11771-015-2884-0.

Jesus Guerrero, Jorge Torres, Vincent Creuze, Ahmed Chemori, Eduardo Campos Mercado. (2019) Saturation based nonlinear PID control for underwater vehicles: Design, stability analysis and experiments. Mechatronics, Elsevier, No 61

Giraldo Suarez, E., Muñoz Gutiérrez, P. y Bonilla Becerra, J. (2016). Identificación y control de un Vehículo Aéreo no Tripulado tipo Quadcopter , USBMed, Vol. 7, No. 1

Chovancová, A.; Fico, T.; Duchoň, F.; Dekan, M.; Chovanec, L.; Dekanová, M. (2020). Control Methods Comparison for the Real Quadrotor on an Innovative Test Stand. Appl. Sci.,10, 2064

S. Wang, H. Jin, L. Meng and G. Li, (2016) "Optimize motion energy of AUV based on LQR control strategy," (2016) 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, 2016, pp. 4615-4620, doi: 10.1109/ChiCC.2016.7554068.

S. A. Mohamed, A. A. Osman, S. A. Attia and S. A. Maged, (2020). "Dynamic Model and Control of an Autonomous Underwater Vehicle," International Conference on Innovative Trends in Communication and Computer Engineering (ITCE), Aswan, Egypt, 2020, pp. 182-190, doi: 10.1109/ITCE48509.2020.9047757.

Du, Gang, Zhan, Xingqun, Gu, Yunbiao, Zhai, Chuanrun, (2011), "Research on Embedded Model-Aided Autonomous Navigation for Miniature AUVs," Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR., pp. 1839-1844.

H. S. Vieira, E. C. de Paiva, S. K. Moriguchi and J. R. H. Carvalho, (2020), "Unified Backstepping Sliding Mode Framework for Airship Control Design," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 56, no. 4, pp. 3246-3258, doi: 10.1109/TAES.2020.2975525.

Valeriano Medina, Y., Hernández, L., Garcia Garcia, D., Hernández Morales, L. E., Miranda Jiménez, L., & Milián Morón, O. (2020). Esquema de guiado para el seguimiento de caminos rectos en un vehículo sub-acuático. Revista Cubana De Transformación Digital, 1(2), 85-95.

Hernandez Julian, Anailys & Valeriano, Yunier & Gómez, Jorge & Hernández, Luis. (2016). Controlador I-LOS considerando la distancia lookahead constante para el seguimiento de caminos curvos en AUV.

Escobar Ponce, P. D., & Imba Cruz, D. I. (2018). Comparación Mediante Simulación de Tres Controladores Basados en las Estrategias de Control Tipo PID Y Modo Deslizante (SMC) Aplicadas al Seguimiento de Trayectoria de un Vehículo Autónomo Sumergible. 161 hojas. Quito : EPN.

A. Benaddy, M. Bouzi and M. Labbadi, (2020), "Comparison of the different control strategies for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle," 2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), Fez, Morocco., pp. 1-6, doi: 10.1109/ISCV49265.2020.9204143.

Liang X, Qu X, Hou Y, Zhang J. (2017) Three-dimensional path following control of underactuated autonomous underwater vehicle based on damping backstepping. International Journal of Advanced Robotic Systems.. doi:10.1177/1729881417724179

Zhang, Mingjun; Liu, Xing; Wang, Fei. (2017). Backstepping Based Adaptive Region Tracking Fault Tolerant Control for Autonomous Underwater Vehicles. The Journal of Navigation; Cambridge Tomo 70, N.º 1. DOI:10.1017/S0373463316000370

Li X., Ren C., Ma S., Zhu X. (2020) Compensated model-free adaptive tracking control scheme for autonomous underwater vehicles via extended state observer. Ocean Engineering, Volume 217,

SANCHEZ-FONTES, E. et al. (2020). Nuevo vehículo aéreo autónomo estable por construcción: configuración y modelo dinámico. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, No. 3, p. 264-275, ISSN 1697-7920

Spandan Roy, Sambhunath Nandy, Sankar Nath Shome, Ranjit Ray, (2013). IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE).

Zain Anwar Ali; Dao Bo Wang; Muhammad Aamir; Suhaib Masroor (2017) MRAC base robust RST control scheme for the application of AUV. International Journal of Modelling, Identification and Control (IJMIC), Vol. 28, No. 3,

X. Cao and X. Xu, (2020), "Hunting Algorithm for Multi-AUV Based on Dynamic Prediction of Target Trajectory in 3D Underwater Environment," in IEEE Access, vol. 8, pp. 138529-138538, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3013032.

A. M. Elhennawy and M. K. Habib, (2018), "Nonlinear Robust Control of a Quadcopter: Implementation and Evaluation," IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, pp. 3782-3787, doi: 10.1109/IECON.2018.8591344.

Omar A.Jasim Sandor M.Verés (2020). A robust controller for multi rotor UAVs Aerospace Science and Technology Volume 105,, 106010

R. Prasanth Kumar, A. Dasgupta, C.S. Kumar(2007) Robust trajectory control of underwater vehicles using time delay control law Ocean Engineering 34 842–849

A. Budiyo (2009) Robust Control Synthesis for an Unmanned Underwater Vehicle World Academy of Science, Engineering and Technology 60

Spandan Roy, Sambhunath Nandy, Sankar Nath Shome, Ranjit Ray (2013) Robust Position Control of an Autonomous Underwater Vehicle: A Comparative Study. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)

Elham Yazdani Bejarbaneha, Mojtaba Masoumnezhadb, Danial Jahed Armaghani, Binh Thai Phamd(2020), Design of robust control based on linear matrix inequality and a novel hybrid PSO search technique for autonomous underwater vehicle , Applied Ocean Research Volume 101, 102231

Pawłowski, P. y Konatowski, S. (2020). Linear controller design with the use of PSO algorithm for UAV trajectory tracking Proceedings. Radioelectronic Systems Conference 2019. Volume 11442, , Jachranka, Poland. <https://doi.org/10.1117/12.2565129>

Qu, C., Gai, W., Zhang, J. & Zhong, M. (2020). A novel hybrid grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) path planning. Knowledge-Based Systems Volume 194, 105530

Chybaa, M., Haberkornd, T. , Singha, S., Smithb, R. & Choic,S. (2009) Increasing Underwater Vehicle Autonomy by Reducing Energy Consumption. Ocean Engineering Volume 36, Issue 1,, Pages 62-73

Rout,R & Subudhi,B. (2017). Inverse optimal self-tuning PID control design for an autonomous underwater vehicle. International Journal of Systems Science Volume 48, Issue 2

Li, A., Li, Y., Cao, J., Jiang,Y., Hea, J, & Wu, H, (2020). Proximate time optimal for the heading control of underactuated autonomous underwater vehicle with input nonlinearities. Applied Ocean Research Volume 95, 102002

Ngoc Phi Nguyen & Sung Kyung Hong (2018). Position Control of a Hummingbird Quadcopter Augmented by Gain Scheduling. *International Journal of Engineering Research and Technology*. Volume 11, Number 10 , pp. 1485-1498, ISSN 0974-3154

Craig, W., Yeo, D. and Paley, D. (2020). Geometric Attitude and Position Control of a Quadrotor in Wind. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.
<https://doi.org/10.2514/1.G004710>

Jian, Y., Zhong-hai, Z. , Wen-xia, Z. . (2012). A Feedback Linearization based Leader-follower Optimal Formation Control for Autonomous Underwater Vehicles. Institute of Oceanographic Instrument of Shandong Academy of Science, Qingdao, 266001

Ji Hyun Moon and Ho Jae Lee (2018). Decentralized Observer-Based Output-Feedback Formation Control of Multiple Unmanned Underwater Vehicles. *J Electr Eng Technol*. No 13. Vol 1: 495-502,
<http://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.1.495>

Rapeepong Rattanawaorahirunkul , Peerayot Sanposh, Kanjanapan Sukvichai , Yodyium Tipsuwan , Phakhachon Hoonsuwan (2020) Feedback Linearization with PID Controller Design for Autonomous Underwater Vehicle Using Particle Swarm Optimization (PSO) Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

C. Fu, A. Sarabakha, E. Kayacan, C. Wagner, R. John and J. M. Garibaldi, (2016). "A comparative study on the control of quadcopter UAVs by using singleton and non-singleton fuzzy logic controllers," *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Vancouver, BC, 2016, pp. 1023-1030, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737800.

Mesdaghi, S., Dosarianian-Moghadam, M. (2019). 'A Fuzzy Logic Control System for Quadcopter by Human Voluntary-Physical Movements', *Journal of Computer & Robotics*, 12(1), pp. 39-45.

Hasan Kemik, Mehmet Berkin DaYesim Oniz. (2020). Trajectory Tracking of a Quadcopter Using Adaptive Neuro-Fuzzy Controller with Sliding Mode Learning Algorithm. *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems INFUS 2020: Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solutions* pp 1084-1091|

Ferdaus, M.M., Anavatti, S.G., Pratama, M. et al. (2020). Towards the use of fuzzy logic systems in rotary wing unmanned aerial vehicle: a review. *Artif Intell Rev* 53, 257–290. <https://doi.org/10.1007/s10462-018-9653-z>

Ishaque, K., Abdullah, S.S., Ayob, S.M. et al. (2010). Single Input Fuzzy Logic Controller for Unmanned Underwater Vehicle. *J Intell Robot Syst* 59, 87–100
<https://doi.org/10.1007/s10846-010-9395-x>

P. S. Londhe, M. Santhakumar, B. M. Patre and L. M. Waghmare, (2017). "Task Space Control of an Autonomous Underwater Vehicle Manipulator System by Robust Single-Input Fuzzy Logic Control Scheme," in IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 42, no. 1, pp. 13-28, <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2548820>

Londhe, P.S., Patre, B.M. (2019). Adaptive fuzzy sliding mode control for robust trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle. Intel Serv Robotics 12, 87–102 . <https://doi.org/10.1007/s11370-018-0263-z>

Bhattacharya D., Puttamadappa C. (2021) Designing of Adaptive Depth Control for Autonomous Underwater Vehicle Using Type-2 Fuzzy Logic Controller. In: Favorskaya M., Mekhilef S., Pandey R., Singh N. (eds) Innovations in Electrical and Electronic Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 661. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4692-1_35

N.Cibiraja & M.Varatharajana (2017). Chattering reduction in sliding mode control of quadcopters using neural networks. Energy Procedia Volume 117, June 2017, Pages 885-892

Mohanty S., Misra A. (2020) Autonomous Control Analysis of an Quadcopter Using Artificial Neural Network. In: Gunjan V., Zurada J., Raman B., Gangadharan G. (eds) Modern Approaches in Machine Learning and Cognitive Science: A Walkthrough. Studies in Computational Intelligence, vol 885. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38445->

R. Amin, A. A. Khayyat and K. G. Osgouie, (2010), "Neural networks control of autonomous underwater vehicle," 2nd International Conference on Mechanical and Electronics Engineering, Kyoto, pp. V2-117-V2-121, doi: 10.1109/ICMEE.2010.5558474.

Chang-Zhong Pan, Simon X. Yang, Xu-Zhi Lai, Lan Zhou (2014), An Efficient Neural Network based Tracking Controller for Autonomous Underwater Vehicles Subject to Unknown Dynamics. The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014-CCDC) - 3300 - 3305

Yun Ni, Liuying Wu, Pengfei Shi, Simon X. Yang, (2017), "A Dynamic Bioinspired Neural Network Based Real-Time Path Planning Method for Autonomous Underwater Vehicles", Computational Intelligence and Neuroscience, vol. 2017, Article ID 9269742, 16 pages,. <https://doi.org/10.1155/2017/9269742>

Duan, K., Fong, S. & Chen, C.L.P. (2020), Multilayer neural networks-based control of underwater vehicles with uncertain dynamics and disturbances. Nonlinear Dyn 100, 3555–3573. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05720-5>

Shraim, H., Harkouss, Y., & Bazzi, H. (2017). A novel hybrid back-stepping and fuzzy logic control strategy for a quadcopter. The Aeronautical Journal, 121(1244), 1444-1463. <https://doi.org/10.1017/aer.2017.70>

Kemik H., Dal M.B., Oniz Y. (2021) Trajectory Tracking of a Quadcopter Using Adaptive Neuro-Fuzzy Controller with Sliding Mode Learning Algorithm. In: Kahraman C., Cevik Onar S., Oztaysi B., Sari I., Cebi S., Tolga A. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solutions. INFUS 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1197. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51156-2_126

Mohan Santhakumar & Thondiyath Asokan (2010) Investigations on the Hybrid Tracking Control of an Underactuated Autonomous Underwater Robot, *Advanced Robotics*, 24:11, 1529-1556, DOI: 10.1163/016918610X512587.

Deng, Zhigang; Zhu, Daqi; Xu, Pengfei; Fang, Jianan (2014) Hybrid Underwater Vehicle: ARV Design and Development. *Sensors & Transducers*; Toronto Tomo 164, N.º 2, 278-287.

Rui Wang , Shuo Wang Yu Wang (2016). A Hybrid Heading Control Scheme for a Biomimetic Underwater Vehicle. *International Society of Offshore and Polar Engineers. The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece 2016. IDISOPE-I-16-625*

Li, Jiyong; Huang, Hai; Wan, Lei; Zhou, Zexing; Xu, Yang. (2019):Hybrid Strategy-based Coordinate Controller for an Underwater Vehicle Manipulator System Using Nonlinear Disturbance Observer. *Robotica*; Cambridge Tomo 37, N.º 10, 1710-1731

M. Cai, Y. Wang, S. Wang, R. Wang, Y. Ren and M. Tan, (2020) "Grasping Marine Products With Hybrid-Driven Underwater Vehicle-Manipulator System," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 1443-1454, doi: 10.1109/TASE.2019.2957782.

Control de la navegación de un UAV utilizando una arquitectura basada en una red neuronal

Alejandro Molina
Horacio Simonetti.

1. Introducción

Gracias a los avances tecnológicos y la reducción de costos, los UAV han ganado importancia significativa en la última década. Se han desarrollado varias plataformas UAV para diferentes aplicaciones, como la agricultura de precisión, la georeferenciación del levantamiento de terrenos y la fotogrametría. Según Shweta Gupte et al [2], los UAV se pueden dividir en ala fija y ala rotativa por el principio de vuelo y el modo de propulsión. Comparado con el ala giratoria, el UAV de ala fija tiene una estructura mucho más simple, lo que proporciona ventajas en capacidad de carga útil, velocidad de crucero y duraciones de vuelo. Sin embargo, todas las soluciones de ala fija necesitan más espacio para despegar y maniobrar y esto es un problema crítico para el vuelo en interiores debido al entorno restringido. Gracias a las capacidades de despegue y aterrizaje vertical (VTOL), flotación y maniobras ágiles, los UAV de ala giratoria son muy adecuados para vuelo interior. Comparativamente, su resistencia y carga efectiva están limitadas ya que todos los empujes son generados por los propios UAVs.

Para aplicaciones realizadas en exteriores, la navegación autónoma se basa en gran medida en la disponibilidad de la señal GPS. Sin embargo, para aplicaciones en interiores como la inspección de silos, la gestión de almacenes y la gestión de desastres, etc., surgen nuevos desafíos debido en los entornos donde no se puede usar el sistema de navegación tradicional como al aire libre.

Según Mautz et al. [3] y por Mainetti et al. [4], el principal reto en aplicaciones interiores para UAV, especialmente cuando se realiza un vuelo autónomo en interiores, es la atenuación o anulación de la señal del sistema de navegación global por satélite (GNSS), producida por los efectos de la reflexión de la señal, en paredes y muebles (20-30 dB en comparación con el exterior). Además, la densidad del obstáculo es mucho mayor debido a la masa de objetos estáticos como pilares y estantes con mercaderías. Aún más, las actividades

humanas son más frecuentes en interiores, lo que tiene un gran impacto en los UAV. Por ejemplo, abrir una ventana podría afectar el medio ambiente, al cambiar las ubicaciones de los obstáculos, la intensidad de la iluminación y la distribución de la presión [5]. Los sensores ligeros y pequeños a bordo con alta precisión y rendimiento de precisión (nivel centimétrico) y baja latencia son obligatorios para las aplicaciones de UAV en interiores. Se han propuesto algunas arquitecturas de navegación, para superar los desafíos anteriores en aplicaciones de interiores [6].

El elemento central de todas las arquitecturas de navegación de un UAV es el sensor de inercia [7], también conocido como Unidad de Medición Inercial (IMU), junto con otras soluciones de sensores para superar sus limitaciones y permitir que el UAV sea consciente de los obstáculos. La arquitectura propuesta se basa en una IMU, un escáner láser y una cámara: los datos de salida de los sensores se fusionan mediante un Filtro de Kalman Extendido (EKF) [8], para realizar la localización y el mapeo simultáneos (SLAM). El trabajo propuesto por Gageik et al. [9] consiste en una cámara de flujo óptico, para la estimación de la posición, además de IMU y sensores infrarrojos, para la estimación de la actitud y la altura, respectivamente. Los resultados de las pruebas muestran una alta precisión, pero es obligatorio un controlador PID personalizado para el control de UAV. Un enfoque similar propone Shen et al. [10], en el que un EKF combina IMU y datos de flujo óptico para la estimación de la velocidad y la posición. Al mismo tiempo, un filtro de Kalman de dos etapas calcula la estimación de actitud utilizando información de giróscopo, acelerómetro y magnetómetro en estado de movimiento estático o uniforme, durante las fases de aceleración y desaceleración, solo el giróscopo se usa para estimar la actitud del UAV. El sistema de navegación basado en la visión es una solución emergente que permite enfrentar los desafíos del entorno interior. La arquitectura propuesta por McGuire et al. [11] se basa en una sola cámara para permitir la navegación autónoma y la identificación de un objetivo específico por parte de un MAV: se ha implementado un modelo de aprendizaje profundo en un controlador personalizado para imitar la estrategia de control de un piloto experto.

La estimación de la posición absoluta también se puede lograr utilizando la medida del Tiempo de Vuelo (ToF). Li et al. [12] describen un sistema de navegación autónomo para la estimación de posición 3D basada en sensores de anclaje y etiquetas de banda ultra-ancha (UWB). La estrategia de fusión de datos implementada requiere un escáner láser 3D para la detección de obstáculos y una IMU, que integre los datos de posicionamiento proporcionados por estos sensores y genere una estimación de posición consistente, precisa y útil. Zhou et al. [13] describe una arquitectura compleja en la que el sensor ultrasónico, la IMU, la cámara estéreo y el sistema de

seguimiento de movimiento óptico se combinan para realizar una navegación interior autónoma. En este caso, el posicionamiento absoluto lo proporciona un sistema de seguimiento de movimiento óptico llamado Vicon; que necesita dos cámaras estéreo y el sensor ultrasónico para evitar obstáculos. Gracias al sensor ultrasónico, el sistema puede detectar obstáculos que son transparentes o sin textura. Una investigación previa indica que los sistemas basados en la visión, tanto las cámaras estéreo como los sensores de flujo óptico, desempeñan un papel cada vez más importante en el vuelo autónomo en interiores a medida que las computadoras integradas se vuelven cada vez más potentes. Sin embargo, se necesitan sensores adicionales para compensar los inconvenientes, como la sensibilidad de la iluminación, la dependencia de la superficie reflectante y la alta latencia debido a la gran carga computacional. Además, los algoritmos SLAM se vuelven mucho más populares en aplicaciones de interior, ya que su capacidad para reconstruir el escenario circundante es vital en un entorno interior cambiante. La arquitectura propuesta en este trabajo implementa los algoritmos de control y navegación en FCU y en una computadora complementaria, respectivamente. En comparación con la modificación del firmware original, esta configuración facilita la sustitución de módulos específicos, especialmente para el desarrollo de nuevos algoritmos. Otra ventaja de este marco es su menor requerimiento de carga útil y una mayor flexibilidad para la sincronización y fusión de datos. Ambos lo hacen especialmente adecuado para pequeños vehículos aéreos no tripulados que realizan misiones autónomas en entornos interiores complejos y de riesgo.

Este trabajo documento se estructura así: en la sección 2 se hace una comparación de diferentes tecnologías de sensores en rendimiento, limitación y costo, etc.; en la sección 3 se explica la arquitectura del sistema GNC analizado, tanto en hardware como software; en la sección 4 detalla las actividades experimentales realizadas; en la sección 5 se explica la creación de un conjunto de datos personalizados y la arquitectura CNN que se utilizó; en la sección 6 se proporcionan resultados de experimentos, en escenarios de corredores reales; y finalmente, en la sección 7 se formulan algunas conclusiones.

2. Comparación de sensores.

Para realizar una descripción general de sensores para aplicaciones de navegación interior se propone en la Figura 1 una clasificación de sensores basada en sus principales características.

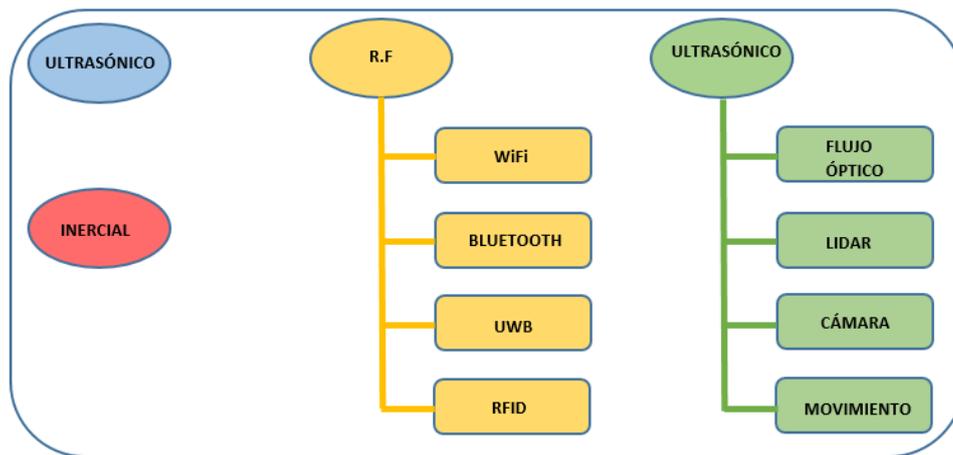


Figura 1 - Categorización de los Sensores de Navegación.

2.1. Sensores ultrasónicos.

Los sensores ultrasónicos se utilizan para la detección de obstáculos para evaluar una distancia en línea recta desde el objeto más cercano en el camino de los vehículos. Su peso ligero (10 g), dimensión pequeña (pocos centímetros) y bajo consumo de energía (50 mW típico) hacen que los sensores ultrasónicos sean extremadamente útiles para aplicaciones UAV con capacidades de carga útil restringida. Además, esta familia de sensores es bastante barata. A pesar que los sonares tienen alto nivel de precisión, el principal inconveniente de estos sensores es su limitado alcance (pocos metros). Además, los rendimientos de los sensores ultrasónicos están estrechamente relacionados con la humedad y temperatura.

Los sensores ultrasónicos también se pueden utilizar como un sistema de posicionamiento absoluto mediante la configuración de balizas móviles con varios anclajes estacionarios. El sensor genera pulsos de ultrasonido para detectores estacionarios: basado en el Tiempo de Vuelo (ToF) y utilizando algoritmos de triangulación, un enrutador central evalúa la posición del móvil en un sistema de referencia absoluta. Una solución típica es la Marvelmind propuesta por Run [14], que se utilizará en el modelo analizado.

2.2. Sensores Lidar.

Al considerar los sensores Lidar (Detección de luz y Distancia Laser), se incluyen dos categorías: telémetro y escáner. El primero se caracteriza por un solo rayo láser, proporcionado por el emisor del sensor y reflejado por obstáculos: se utiliza el ToF para medir la distancia de un solo punto. Los costos del telémetro varían dependiendo de lo considerado el rendimiento, pero se mantienen dentro de valores que oscilan entre 100 a 1000 dólares. Por el contrario, los escáneres permiten adquirir información de una nube de puntos gracias a un sistema de dirección controlada o sistemas de espejo. Los datos de la nube de puntos incluyen la distancia a obstáculos, basados en ToF, ángulos de orientación, nivel de reflexión en la superficie y coordenadas GPS (solo para sensores georeferenciados). Normalmente, para crear un modelo de entorno completo, un solo escaneo no es suficiente; además, la gestión de la nube de puntos requiere mayores capacidades computacionales. Por último, los escáneres son más caros que el telémetro: con costos que van desde 1.000 hasta 30.000 dólares.

Las principales tecnologías utilizadas por los sensores Lidar son el láser infrarrojo y LED. Mientras que los láseres permiten medir un punto a gran distancia, hasta 100 m, sufren pérdidas atmosféricas, necesitan una corriente de activación de umbral y un refrigerador adicional. Esto hace que por las dimensiones y el peso, el sensor Lidar láser no es adecuado para aplicaciones de UAV ligeras. Los LED infrarrojos, en cambio, suelen ser más ligeros, más pequeños y más baratos que el láser; experimentan menos consumo de energía, sin embargo, sus prestaciones también son limitadas. El haz difuso de LED infrarrojo reduce el alcance del sensor, a menudo alrededor de 10 m, con un campo de visión de 3 °.

2.3. Sensores de radiofrecuencia.

Los sensores de radiofrecuencia se utilizan para detectar la posición absoluta de un emisor móvil mediante la evaluación de la intensidad de señal recibida (RSSI), o la triangulación del ToF. Bluetooth y Banda Ultra Ancha (UWB) son las principales tecnologías consideradas, que muestran una diferencia de performance en alcance y precisión. Si bien UWB permite una precisión del orden del centímetro, gracias a la corta duración de los pulsos (1 ns típico) y un alcance de hasta 300 m; las soluciones Bluetooth muestran un nivel de precisión y rendimiento más bajo (100 m máximo), según la Clase Bluetooth considerada. Por lo general, el costo de un conjunto completo de balizas estacionarias y móviles, oscila entre los 1.000 dólares. Los principales inconvenientes de esta familia de sensores son las reflexiones múltiples y la

interferencia con otros dispositivos interiores, que pueden proporcionar señales falsas al GPS, lo que resulta en un peligro durante el vuelo.

2.4. Sensor de flujo óptico.

Las cámaras de flujo óptico se utilizan para la detección de la velocidad, el azimut y el incremento de posición; al comparar conjuntos de imágenes consecutivas. El rendimiento y el nivel de precisión están relacionados con el sensor y el algoritmo a considerar. Las cámaras de flujo óptico se caracterizan por su tamaño pequeño y peso ligero, además requiere bajas capacidades computacionales y tienen un costo aceptable (ronda los 100 dólares). Las cámaras de percepción de profundidad, estéreo o IR, son tecnologías emergentes en robótica porque permiten una reconstrucción y comprensión en 3D del entorno. La alta precisión de posición y orientación, 1 mm y 0,1 ° respectivamente, hacen que estos sensores sean adecuados para realizar algoritmos de odometría visual. Sin embargo, se debe tener en cuenta su alto costo computacional ya que requiere una unidad de procesamiento gráfico (GPU) dedicada. Para la cámara de percepción de profundidad infrarroja, según lo informado por Zhou [13], se requieren sensores adicionales ya que la luz IR no puede detectar objetos como ventanas y vidrios.

2.5. Sistemas de seguimiento de movimiento por cámara.

Los sistemas de seguimiento de movimiento utilizan marcadores reflejados, generalmente instalados a bordo, para detectar la posición, velocidad y orientación. Diferentes UAV pueden volar al mismo tiempo utilizando marcadores con diferentes formas. Cada cámara tiene su propia área de cobertura, dependiendo del campo de visión, la luz infrarroja se usa a menudo para compensar las condiciones de luz débil. Una estación terrestre recibe y procesa datos de la cámara, permitiendo la reconstrucción y seguimiento de los movimientos. Se necesita una computadora complementaria a bordo para proporcionar la señal del GPS a la placa del piloto automático. A pesar de sus altos rendimientos, los sistemas de cámaras de seguimiento de movimiento necesitan una infraestructura personalizada y una calibración periódica: además tienen un alto costo (hasta 30,000 dólares).

3. Arquitectura GNC.

3.1. Arquitectura de Hardware.

Sobre la base de las investigaciones y observaciones anteriores, han propuesto una arquitectura de navegación y guía en interiores, diseñando un sistema de control (GNC) para un cuadcóptero, cuyo diagrama completo se muestra en la Figura 2.

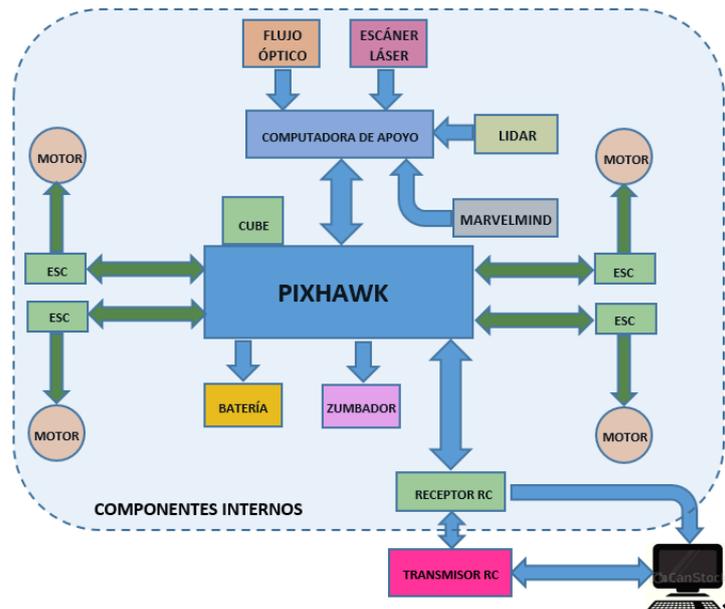


Figura 2 - Arquitectura de Hardware.

Todo el sistema se divide en cuatro partes: estación terrestre, aviónica a bordo, actuadores a bordo y accesorios. Los detalles se enumeran a continuación:

- Estación terrestre: un monitor de tierra se comunica con la aviónica para obtener el estado en tiempo real y enviar comandos de control a través de radio o telemetría Bluetooth. Aquí se utiliza Bluetooth en lugar de señales de radio para evitar el atasco de frecuencia con Marvelmind, ya que ambos dispositivos funcionan a la misma frecuencia (433MHz).
- Aviónica: el sistema consta de tres partes:
 1. Diferentes sensores, que proporcionan toda la información de navegación requerida, como la posición actual, la velocidad y la actitud, etc. El modelo usa tres IMU redundantes montadas en PIXHAWK 2.0 Cube y otros sensores como dispositivos ultrasónicos, escáner laser, medidor de distancia LED y una cámara de flujo.
 2. Computadora de apoyo: ya que la mayoría de los algoritmos de procesamiento y uso de datos requieren bastante tiempo de

procesamiento y no pueden ser manejados por la placa de la unidad de control de vuelo (FCU), la solución más adecuada consiste en usar una computadora complementaria para leer todos los datos del sensor y procesar todos los algoritmos de navegación y guía. La parte de control está en la FCU.

3. El controlador de vuelo se utiliza para tratar todas las acciones de gestión y control, como operar armar/desarmar, responder al transmisor RC, ajustar la velocidad del motor, etc. La FCU de código abierto más popular es PIXHAWK y como se mencionó anteriormente, el módulo utilizado es PIXHAWK 2.0 Cube.

- Actuadores a bordo: el cuadricóptero tiene cuatro motores sin escobillas con los respectivos Controladores Electrónicos de Velocidad (ESC) dispuestos en un marco de configuración cruzada. Los accesorios utilizados son: regulador de batería, zumbador, LED externo, etc.

3.2. Arquitectura de software.

Para obtener un rendimiento más flexible y sólido, el sistema posee una estructura distribuida, basada en el Sistema de operación robótica (ROS) con una computadora complementaria, Raspberry 3 Modelo B. El sistema completo se divide en tres partes como se muestra en el diagrama de la Figura 3.

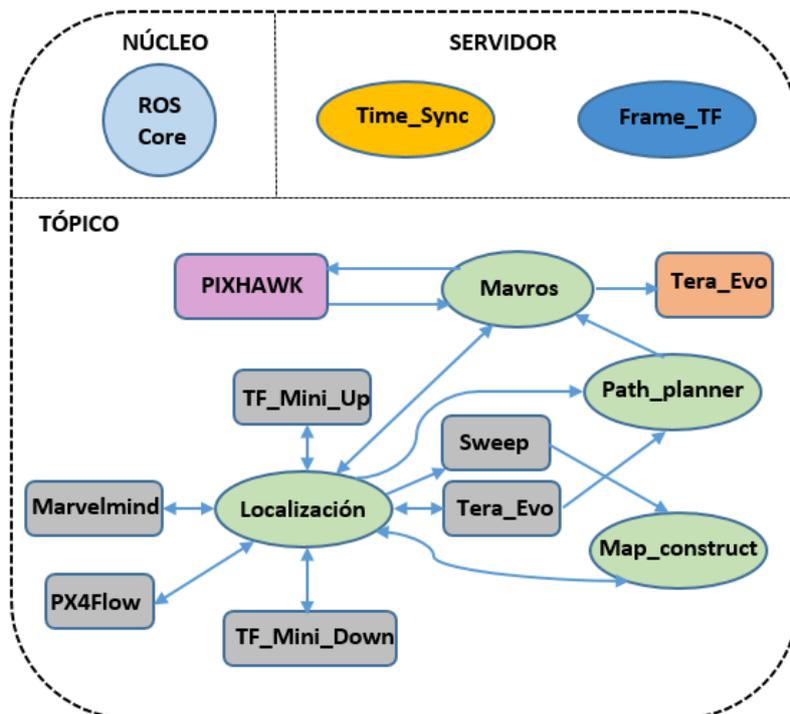


Figura 3 - Diagrama ROS en Raspberry Pi 3B+

Núcleo ROS: es el nodo maestro único en un sistema ROS, cada sistema ROS debe tener un núcleo ROS único y todos los demás componentes ROS (por ejemplo, servicio, tema, acción, etc.) están todos registrados en el núcleo ROS.

Servidor ROS: es uno de los mecanismos de comunicación del ROS. En este mecanismo, el nodo cliente solicita el servicio desde el nodo del servidor, que responde a esta solicitud llamando a funciones ya definidas. Por lo tanto, implementa funcionalidades que se solicitan en todos los nodos ROS como servicio, es decir, sincronización de tiempo (Time_Sync) y transformación de trama (Frame_TF).

Tópico ROS: es otro mecanismo de comunicación del ROS. El nodo editor publica mensajes en un tema y el nodo suscriptor puede obtener un mensaje al suscribirse a este tema. Por lo tanto, este mecanismo es bastante adecuado para que los nodos sigan publicando datos como la lectura del sensor, la localización y la planificación de la ruta, etc.

3.3. Comparación con la arquitectura tradicional GNC.

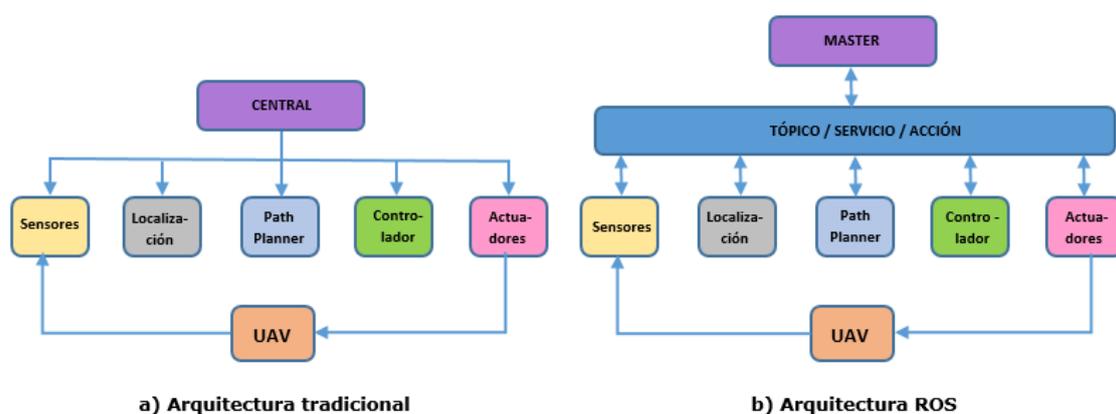


Figura 4 – Comparación de Arquitecturas.

Con respecto a las tradicionales, esta nueva arquitectura GNC presenta las siguientes características innovadoras, que la hacen adecuada para el desarrollo de pequeños vehículos aéreos no tripulados que realizan misiones autónomas en entornos interiores complejos y de riesgo:

- Descentralizado: en las arquitecturas GNC tradicionales, hay una unidad de control central, que se encarga de los flujos de trabajo de todo el sistema. Mientras tanto, cada nodo sigue esperando hasta que finalicen las tareas de su nodo anterior. Esta centralidad de la unidad de control no es obligatoria para una arquitectura basada en ROS, lo que significa que todas las unidades pueden funcionar en paralelo. Como se muestra en la Figura 4, en lugar de intercambiar y procesar datos siguiendo los comandos de la unidad de control central, en esta arquitectura distribuida cada nodo intercambia datos solo en función de su propia interfaz de entrada/salida (IO) y de las marcas de tiempo de los datos. El nodo maestro no es más que una base de datos que contiene información de todos los nodos del sistema, dado que los comandos de control no se envían a otros nodos. Todo el procesamiento de datos se realiza local y periódicamente. Esta característica hace que el sistema sea más robusto, ya que la falla en un nodo no afectará a otros nodos en este sistema.
- Plug and Play: Al agregar una unidad de sensado adicional, o eliminar una unidad defectuosa, la única operación necesaria es registrar/borrar su información en el nodo maestro. Todos los demás nodos se mantienen sin cambios y todo el sistema sigue trabajando sin reorganizar la arquitectura. Esta característica hace que la solución propuesta sea bastante flexible, especialmente para el desarrollo de vehículos pequeños para vuelo en interiores, ya que diferentes sensores del UAV pueden estar inutilizados en distintos escenarios.

4. Experimentos realizados.

Se han realizado una clasificación de todos los sensores para evaluar su rendimiento, de acuerdo a la hoja de datos proporcionada por el fabricante, como frecuencia de actualización, corrimiento estático, ruido dinámico.

Para definir el sistema de posicionamiento adecuado, se han realizado varios vuelos interiores en un área de vuelo definida por una jaula de 5x5x5 mts., con ocho cámaras OptiTrack instaladas en la parte superior. Se instaló un marcador reflectante en la parte superior del cuadricóptero, para rastrear su posición por las cámaras, mientras que la baliza móvil Marvelmind se colocó en la parte inferior, con todos los anclajes ultrasónicos en el piso. Como Marvelmind y OptiTrack utilizan un marco de referencia diferente, se aplicó una transformación a los datos de salida de OptiTrack para poder realizar comparaciones. La baliza móvil ultrasónica fue conectada a la placa del piloto automático a través del puerto GPS, el sistema óptico se utilizó solo para el seguimiento de la trayectoria. Las pruebas se realizaron en modo Loiter: el UAV se controla utilizando los datos de posición de un GPS falso para

determinar su ubicación cuando no se usan los controles manuales. Los comandos del piloto se limitaron al canal 3: el acelerador. Se comprobó que el desplazamiento en altitud entre OptiTrack y Marvelmind era función de la distancia vertical de los dos sensores a bordo de UAV. La desviación cuando el dispositivo está aterrizando, depende de cuán cerca esté la baliza móvil del plano de los anclajes, y la posición relativa entre los dos sistemas. Se demostró que la posición de Marvelmind tiene una precisión menor que la precisión estática declarada, esto podría estar relacionado con su sensibilidad a la altitud y la perturbación del ruido.

Se verifica así que el diseño distribuido hace que el sistema sea más robusto y flexible, comparado con las arquitecturas GNC tradicionales, lo cual es particularmente adecuado para el desarrollo de pequeños UAV que realizan misiones autónomas en entornos complejos y de riesgo, en interiores.

A continuación, en lugar de operar el dispositivo en modo Loiter, se agregó al UAV una cámara frontal monocular, para efectuar navegaciones autónomas en interiores, donde no hay señal GPS, utilizando un modelo de Redes Neuronales Convolucionales (RNC-CNN). Este enfoque consistió en adiestrar un clasificador de imágenes utilizando técnicas de aprendizaje profundo para suplantar a un piloto experto, eligiendo los comandos de vuelo para la navegación autónoma del UAV en escenarios de corredor interior. El modelo propuesto utilizará una arquitectura CNN [15], DenseNet-161 [16], que entrenará un conjunto de datos personalizado. El clasificador recibe la información de la cámara frontal del cuadricóptero y devuelve un comando de navegación, para que tome una decisión correcta en la navegación autónoma. Las contribuciones del modelo utilizado son:

- Mostrar una arquitectura de aprendizaje profundo para la navegación autónoma en interiores, en escenarios de corredores.
- Proporcionar un conjunto de datos personalizado, que contiene imágenes en diferentes posiciones de varias longitudes de los pasillos.

5. Creación de un conjunto de datos personalizados en la arquitectura CNN.

El objetivo de lograr que un cuadricóptero navegue en forma autónoma por un corredor, es reproducir las capacidades de un piloto humano al tomar las decisiones adecuadas en tiempo real. Las imágenes a utilizar son generadas por una cámara ubicada en la parte frontal del UAV. El clasificador entrenado devolverá una salida a un comando de vuelo en tiempo real, que posibilite una correcta navegación. El clasificador se entrena a partir de una selección de decisiones generadas por un piloto experto. El proceso de entrenamiento hace que el clasificador aprenda las estrategias más efectivas para controlar la navegación con muy poca probabilidad de fallas. El entrenamiento del modelo se realizó bajo el enfoque de aprendizaje supervisado, en el cual los parámetros del modelo se aprenden por comparación fina con el conjunto de datos provistos por el entrenador. La entrada al modelo entrenado es una imagen en tiempo real generada por la cámara monocular y la salida del mismo es la probabilidad de diferentes clases de marcas, tales como: ir hacia adelante, girar a la izquierda o a la derecha y parar. Si la confiabilidad de la salida del modelo es baja, entonces el modelo tomará el próximo fotograma, hasta que pueda producir un comando de vuelo válido y confiable.

5.1. Conjunto de Datos.

Varios conjuntos de datos pertenecientes a escenarios interiores se pueden encontrar en [14, 17]. Si bien estos datos son públicos, no son de utilidad para el modelo propuesto, ya que no contiene verdaderos valores referidos a los comandos de vuelo, así que se debe crear un conjunto de datos particular en cada escenario, para asegurar una aplicación exitosa del modelo. Esto se lleva a cabo a partir de las imágenes capturadas por la cámara frontal desde distintas longitudes del corredor interior. Para cada longitud, se seleccionan tres ubicaciones diferentes, sobre una línea horizontal que corta perpendicularmente al corredor. Estas ubicaciones principales coinciden con los dos lados extremos y centro del corredor; en cada ubicación se capturan tres imágenes diferentes, alineando la cámara hacia adelante, izquierda y derecha. De esta manera se obtienen nueve imágenes diferentes para una longitud dada del corredor, tomadas a una altura constante de un metro; con esto se logra simplificar el proceso computacional. De esta forma, se pueden obtener alrededor de 3.000 imágenes diferentes a través de 30 corredores diferentes. Utilizando técnicas de aumento, como zooming y flipping, se puede incrementar el número de imágenes para adiestramiento a cerca de

13.000. La resolución mínima de las imágenes debe ser 320x180. Durante las experiencias reportadas en [] obtenidas en tiempo real, el UAV se controla a una altura constante utilizando solamente los siguientes cuatro comandos: Cabeceo-Adelante, Rolido-Izquierda, Rolido-Derecha y Stop, que se ejecuta cuando el cuadcóptero está llegando casi al final del corredor. Las imágenes con alto nivel de ruido se descartan.

5.2. Entrenamiento.

Se utiliza el modelo pre-entrenado DenseNet-161 [16]. Después de eliminar la capa final del modelo original, se aumenta este modelo con 3 capas de convolución seguidas por 1 capa completamente conectada al final. La Figura 5 muestra las capas de convolución del modelo pre-entrenado de DenseNet-161, donde las capas de la porción inferior son añadidas manualmente. El modelo se entrena con el conjunto de datos personalizado descrito. Se utiliza la función de pérdida de Euclides (*Euclidean Loss*) para entrenar a nuestro clasificador:

$$Euclidean\ Loss = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Donde y representa las etiquetas de clase verdadera básica y predicha respectivamente, y N es el tamaño de cada mini lote utilizado para el entrenamiento.

Como se muestra en la Figura 5, el modelo toma una entrada de tamaño 180 x 320 x 3 (alto x ancho x #canales) y produce cuatro etiquetas de clase. En cualquier instante, la clase con mayor probabilidad es el comando de vuelo deseado para la navegación.

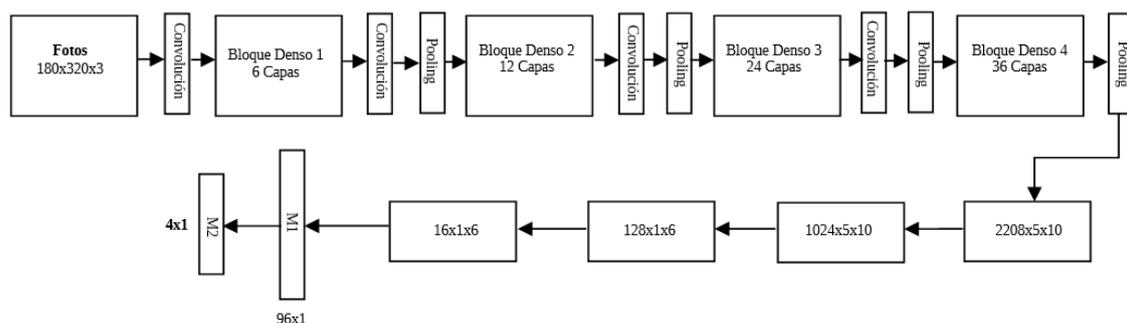


Figura 5 – DNN Propuesta.

Para un ajuste fino, se disminuye la tasa de aprendizaje en un factor de 2, si la pérdida se mantiene igual en 5 épocas consecutivas. La tasa de aprendizaje inicial puede establecerse en 0.001, según las experiencias realizadas.

5.3. Algoritmo de Navegación.

El cuadróptero vuela en forma autónoma hasta que recibe un comando de aterrizaje, llegando al final del corredor. El Algoritmo 1 muestra el conjunto de reglas para navegación autónoma en un corredor interior:

ALGORITMO 1: Navegación autónoma del UAV en corredores

Input: *img*: Imagen desde de la cámara frontal del UAV

Initialization: comando DESPEGAR

```
1 while comando = ATERRIZAR do
2   posicion      Trained_Classifier(img),
3   if posicion = Centro then
4     Actuate UAV in PITCH_FORWARD direction;
5   else if posicion = Left then
6     Actuate UAV in ROLL_RIGHT direction to move to center;
7   else if posicion = Right then
8     Actuate UAV in ROLL_LEFT direction to move to center;
9   else if posicion = End then
10    enviar comando ATERRIZAR;
11  img      Extraer próximo frame desde la cámara frontal del UAV
```

6. Resultados Experimentales obtenidos.

Según reporta Honegger [8], las verificaciones experimentales realizadas sobre este modelo utilizaron un drone Parrot AR, equipado con una cámara monocular frontal estática, una cámara inferior y un sensor de altura ultrasónico, un giróscopo y un acelerómetro. El modelo de aprendizaje profundo corre en un host Xeon, que esta enlazado con el UAV por medio de una WLAN que gestiona el envío de las imágenes en 640x360, que se cambia a 320x180 antes de ingresar a la red neuronal. Después de procesar las imágenes en el clasificador CNN, este genera un comando probable de movimiento, que se envía al UAV para que vuele en forma autónoma y segura.

Para verificar el comportamiento del modelo en todas las ubicaciones posibles dentro del corredor, siguió la siguiente metodología: una prueba tiene éxito si el UAV después de despegar, navega de manera segura hasta el final del corredor y luego aterriza con seguridad. Si el UAV no puede volar toda la longitud del corredor, se considera un fracaso. En consecuencia, se definen dos indicadores para probar la performance del modelo

- Relación de No Colisión (NCR): número de veces sobre el número total de ensayos, que el UAV navega con éxito a lo largo del corredor sin colisión con las paredes.
- Relación de vuelo completo (FFR): número de veces sobre el número total de intentos, que el UAV navega con éxito toda la longitud del corredor, aunque puede haber colisiones laterales leves con las paredes, que no obstaculizan la dirección del UAV.

Los resultados que se obtuvieron se indican en la siguiente tabla:

Sl.No.	Corredores	#Intentos	#Éxito (NCR)	#Éxito (FFR)
1	C-1	50	35 (0.70)	39 (0.78)
2	C-2	50	39 (0.78)	43 (0.86)
3	C-3	50	42 (0.82)	45 (0.90)
Total		150	116 (0.773)	127 (0.847)

Tabla 1. Resultados de la evaluación del modelo analizado

El resultado promedio obtenido para los diferentes corredores es de 0.773 y 0.847 en términos de NCR y FFR respectivamente. Esto se puede mejorar con más número de imágenes de entrenamiento en diferentes corredores de diferentes dimensiones.

7. Conclusiones.

Se ha realizado una revisión detallada de las configuraciones de navegación y las tecnologías de sensores para el vuelo autónomo en interiores de un UAV liviano, especialmente centrado en sus ventajas, limitaciones y costos. Después de una comparación de diferentes tecnologías de sensores, se ha analizado una nueva arquitectura GNC basada en ROS. Este diseño distribuido hace que el sistema sea más robusto y flexible en comparación con las arquitecturas GNC tradicionales, lo cual es particularmente adecuado para el desarrollo de pequeños UAV que realizan misiones autónomas en entornos complejos y de riesgo en interiores. Se ha analizado las pruebas realizadas de sensores a en el UAV y se han propuesto experimentos para validar las condiciones de vuelo.

El modelo con el agregado de una cámara frontal monocular, que produce imágenes para ser procesadas por una CNN, permite generar comandos de control para que el UAV navegue con razonable seguridad en un corredor y demuestra ser computacionalmente eficiente. Los resultados obtenidos por el uso del algoritmo de navegación analizado son muy alentadores y los resultados podrían mejorar en el futuro agregando un mayor número de imágenes entrenadas, en diversos escenarios.

8. Referencias Bibliográficas.

- [1] Valavanis, K. P. and Vachtsevanos, G. J. UAV Applications: Introduction. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.
- [2] Gupte S., Mohandas P., Conrad J. M. A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles. Southeastcon, 2012.
- [3] Mautz, R., et al. Overview of current indoor positioning systems. Geodezija ir kartografija. Vilnius Gediminas Technical University 2009.
- [4] Mainetti, L., Luigi P., and Ilaria S. A survey on indoor positioning systems. Software, Telecommunications and Computer Networks International Conference on. IEEE. 2014.
- [5] Huh, S., Shim, D. H., and Kim, J. Integrated navigation system using camera and gimbaled laser scanner for indoor and outdoor autonomous flight of UAVs. In Intelligent Robots and Systems International Conference IEEE. 2013.
- [6] Mustafah Y. M., Azman A. W., Akbar F. Indoor UAV positioning using stereo vision sensor. Procedia Engineering. 2012.
- [7] Chowdhary G., Johnson E. N., Magree D., et al. GPS denied Indoor and Outdoor Monocular Vision Aided Navigation and Control of Unmanned Aircraft. Journal of Field Robotics. 2013.
- [8] Honegger D., Meier L., Tanskanen P., et al. An open source and open hardware embedded metric optical flow CMOS camera for indoor and outdoor applications. Robotics and Automation, IEEE International Conference on. IEEE. 2013.
- [9] Gageik, N., Strohmeier, M., and Montenegro S. "An autonomous UAV with an optical flow sensor for positioning and navigation. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013.
- [10] Shen, C., et al. "Optical flow sensor INS magnetometer integrated navigation system for MAV in GPS-denied environment. Journal of Sensors. Hindawi Publishing Corporation. 2016.
- [11] McGuire, K., et al. Efficient optical flow and stereo vision for velocity estimation and obstacle avoidance on an autonomous pocket drone. IEEE Robotics and Automation. 2017.
- [12] Li, K., et al. Self-positioning for UAV indoor navigation based on 3D laser scanner, UWB and INS. Information and Automation (ICIA), IEEE International Conference on. 2016.

- [13] Zhou, Q., Danping Z., and Peilin, L. Hybrid obstacle avoidance system with vision and ultrasonic sensors for multi-rotor MAVs. *Industrial Robot: An International Journal*. 2018.
- [14] Run R. S., Xiao Z. Y. Indoor Autonomous Vehicle Navigation-A Feasibility Study Based on Infrared Technology. *Applied System Innovation*. 2018.
- [15] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks, in: *Advances in neural information processing*. 2012.
- [16] Huang, G., Liu, Z., Weinberger, K. Q., van der Maaten, L. Densely connected convolutional networks, in: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017.
- [17] Quattoni, A., Torralba, A. Recognizing indoor scenes, in: *Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Conference on*. 2009.

Control de navegación autónoma subacuática empleando redes neuronales

Claudio Cesar Lopez

1. Introducción

La elaboración de este artículo ha tenido el incentivo de buscar una manera de mostrar una solución al modelo de autonomía de movimiento y navegación de un dispositivo a través del empleo del aprendizaje automático por medio de una red neuronal. En este caso se trata de un dispositivo subacuático. La ventaja del empleo de esta técnica radica en el cambio de paradigma de programación ya que se deja de pensar de manera lógica y matemática. No se hacen ya afirmaciones para confirmar si las propiedades del programa cumplen o no con los requisitos. En las redes neuronales se parte de observaciones sobre un entorno incierto, se realizan experimentos y se usan estadísticas. Esto abre un abanico de posibilidades en áreas aun no exploradas. Por ejemplo, el hecho de reconocer un rostro o el habla de una persona para otro ser humano es relativamente sencillo. Sin embargo si quisiéramos escribir un código para resolver esto, sería muy complicado. El aprendizaje automático zanja este problema sin decirle a la aplicación que hacer, solo con "mostrarle" ejemplos puede obtener resultados satisfactorios. Esto puede extender las posibilidades de crear sistemas aún más complejos. La aplicación de las redes neuronales en la navegación autónoma ha sido empleada con asiduidad por la Empresa Tesla en sus modelos de automóviles autónomos que ya han salido al mercado "para aprender de su experiencia" en las rutas y caminos. El alcance de este artículo es a los efectos de mostrar el algoritmo de una red neuronal sencilla ciñéndose a un tipo de vehículo subacuático disponible. Este modelo se puede ampliar en complejidad, abarcando otros sistemas como el del móvil de referencia. Uno de los procesos más importantes en la operatoria de cualquier vehículo autónomo subacuático, es el de la navegación. La manera en que navegue el dispositivo hará que este pueda alcanzar a cumplimentar el/los objetivo/s buscado/s. Todo esto por supuesto supervisado por el/los operadores/es humano/s ubicado/s en una/s estación/es de trabajo que analizarán y comandarán las acciones de la embarcación. Asimismo, existirá un conjunto de submódulos relacionados, que deberán manejar datos de variado tipo de sensores para lograr que el movimiento del equipo sea el adecuado, incluso

bajo condiciones hidrometeorológicas adversas. Esto último se denomina Control Operativo del ROV cuyo modelo esquemático se muestra en la Figura 1.

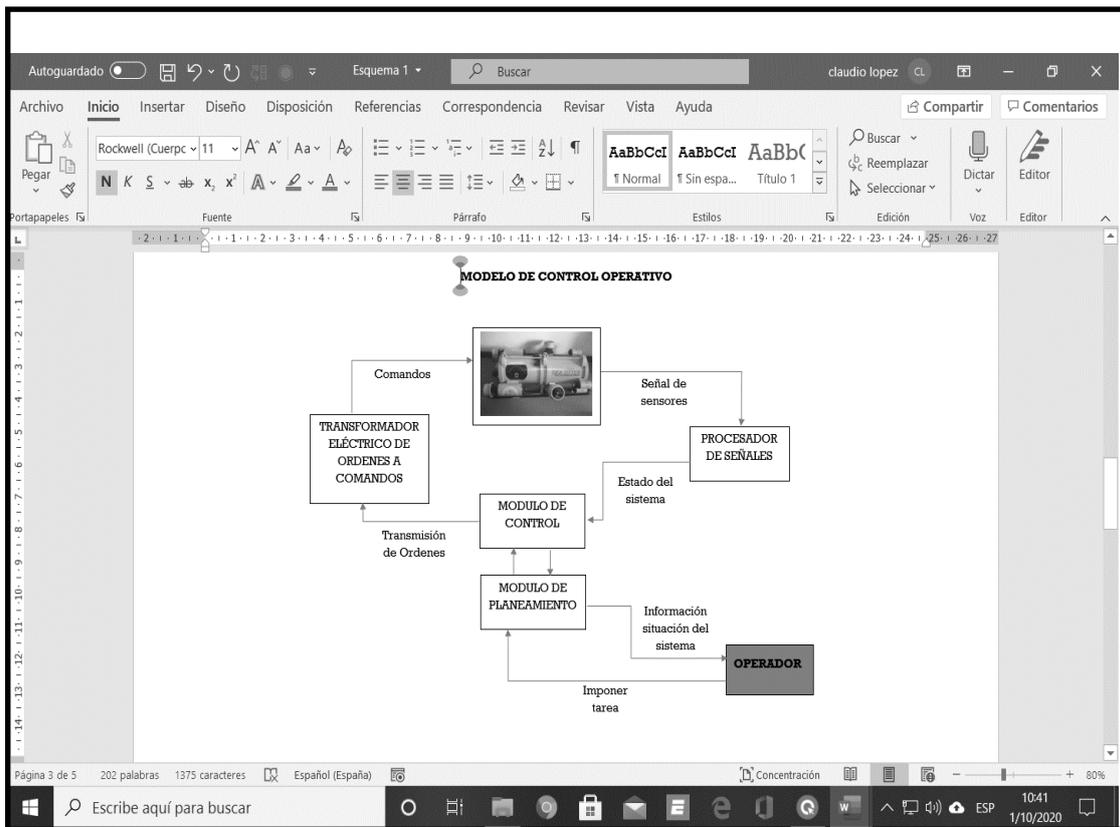


Figura 1: Modelo de control operativo de un ROV

El desafío para diseñar un sistema de control es obtener un modelo matemático apropiado. Con el creciente desarrollo de las computadoras, las aplicaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en la industria marítima se han vuelto importantes. Los enfoques numéricos han evolucionado a un nivel de precisión, lo que permite que se apliquen a vehículos marinos subacuos

El algoritmo que permitirá cumplimentar de manera adecuada las órdenes mencionadas podría emplear una red neuronal que obtenga la adecuada señal para el/los motor/es implicado/s en la maniobra de control de la navegación.

Se ha empleado la inteligencia artificial para su aplicación en este contexto, sin embargo el desarrollo de la tecnología en esta rama de la ciencia ha derivado en el empleo del Machine Learning y de redes DL (Deep Learning), para variados usos.

Uno de esos usos podría llegar a ser los sistemas de control de navegación de vehículos subacuos (UAV, ROV, etc.).

La ventaja de la utilización de redes neuronales es la posibilidad de obtención de resultados adecuados en un menor tiempo de programación (agregando solo instancias o ejemplos).

2. Materiales y Métodos

Para controlar el dispositivo sumergible se pueden emplear distintas técnicas de control que se han propuesto para otros sistemas. Este es el caso de los controladores en lazo cerrado que realimentan las señales medidas por los sensores de un dispositivo. Es el caso de un controlador PID, cuyo algoritmo de control consta de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor proporcional depende del error actual, el integral depende de los errores pasados y el derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar el proceso por medio de un elemento de control, como la posición de una válvula de control o la potencia suministrada a un calentador.

Históricamente, se ha considerado que, cuando no se tiene conocimiento del proceso, el controlador PID es el controlador más adecuado. Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID, el controlador puede proveer una acción de control adaptada a los requerimientos del proceso en específico. La respuesta del controlador puede describirse en términos de respuesta del control ante un error, el grado el cual el controlador sobrepasa el punto de ajuste, y el grado de oscilación del sistema. Nótese que el uso del PID para control no garantiza un control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo.

Los vehículos submarinos están equipados con sistemas de sensores dedicados a determinar la localización del vehículo, su velocidad y aceleración, así como su estado de funcionamiento. Los datos que permiten obtener dichos sistemas integrados como entrada a una red neuronal nos posibilitara controlar los sistemas de gobierno y propulsión.

En este trabajo simularemos las entradas de dos dispositivos PID y un sonar para la detección de obstáculos. Como salidas las de cuatro motores, dos para el eje y (desvío), y dos para el eje z (Movimiento vertical).

El modelo de aprendizaje estará constituido por una red de tres capas con 4 neuronas de entrada, una instancia de capas ocultas y 4 salidas una para cada motor con una función de activación tangente hiperbólica:

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$$

La función tangente hiperbólica transforma los valores introducidos a una escala (-1,1), donde los valores altos tienen de manera asintótica a 1 y los valores muy bajos tienden de manera asintótica a -1. Además, las salidas serán entre 0 y 1 (apagar o encender motor). También cambiaremos las entradas para que todas comprendan valores entre -1 y 1. En este caso las entradas comprenderán las diferencias obtenidas por el algoritmo de control representado por las salidas de un controlador PID en los ejes y y z . El fin de esta red será mantener la derrota y los movimientos del ROV de acuerdo al Plan.

Error PID y	Error PID z	Posición Obstáculo	Distancia Obstáculo	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	-1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	0	0
0	0	1	-1	-1	-1	0	0
0	0	-1	0	0	0	0	0
0	0	-1	1	1	0	0	0
0	0	-1	-1	-1	-1	0	0
0	1	0	0	0	0	1	1
1	0	0	-1	-1	-1	0	0
1	0	1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1	0	0
1	0	1	-1	-1	-1	0	0
1	0	-1	0	0	1	0	0
1	0	-1	1	1	0	0	0
1	0	-1	-1	-1	-1	0	0
1	1	0	0	0	0	1	1
1	1	0	1	0	0	1	1
1	1	0	-1	-1	-1	0	0
-1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	0	-1	-1	-1	0	0
-1	0	1	0	1	0	0	0
-1	0	1	1	1	0	0	0
-1	0	1	-1	-1	-1	0	0
-1	0	-1	0	1	0	0	0
-1	0	-1	1	1	0	0	0
-1	0	-1	-1	-1	-1	0	0
-1	1	0	0	0	0	1	1

Tabla 1: Valores de entrenamiento

Las mencionadas capas de neuronas ocultas podrán aumentarse en cantidad en función de la curva de *Training and validation accuracy*. Para este desarrollo se empleó una capa oculta con 16 neuronas por un lado y otra de 3 capas (dos de 16 y una de 8 neuronas respectivamente) a modo de comparación

El número de *epochs* establecida será de 4000, numero apto para conseguir resultados validos

El entorno de programación que se empleo fue el ofrecido por Google a través de Google Colab con Tesorflow como lenguaje principal.

Del total de los datos se tomaron 30 instancias que conformaron los datos de entrenamiento de la red. Otras 30 fueron los de validación. En las tablas contiguas se muestran los valores de entrenamiento y validación

Error PID y	Error PID z	Posición Obstáculo	Distancia Obstáculo	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
0	1	0	1	0	0	1	1
0	1	0	-1	0	0	1	1
0	1	1	0	0	0	1	1
0	1	1	1	0	1	0	0
0	1	1	-1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	1	0	0
1	1	1	1	0	1	0	0
1	1	1	-1	0	1	0	0
1	1	-1	0	0	1	0	0
1	1	-1	1	0	0	1	1
-1	1	0	-1	1	0	0	0
-1	1	1	0	1	0	0	0
-1	1	1	1	0	0	1	1
-1	1	1	-1	0	0	1	1
-1	1	-1	0	0	0	1	1

Tabla 2: Valores de validación

También estableceremos los siguientes parámetros continuos para contribuir a la simplicidad del modelo:

- La velocidad de los motores será constante

- Los valores de referencia de los motores para el giro de sus hélices serán. 1: giro en sentido horario (avance), 0: sin propulsión, -1: giro en sentido antihorario (reversa)
- El tiempo de operación de los mismos también será constante
- Los intervalos de realimentación de la red serán de al menos 20 segundos

Los valores de cada entrada representan

Error PID y

Valor	Representación
0	El error de salida del PID es > -3 y < 3 en eje y
1	El error de salida del PID es < 3 en eje y
-1	El error de salida del PID es < -3 en eje y

Error PID z

Valor	Representación
0	El error de salida del PID es > -3 y < 3 en eje z
1	El error de salida del PID es < 3 en eje z
-1	El error de salida del PID es < -3 en eje z

Posición Obstáculo

Valor	Representación	Observaciones
0	No hay obstáculo	
1	Obstáculo a la derecha	Si Distancia Obstáculo es 0 no hay efecto de este valor
-1	Obstáculo a la izquierda	Si Distancia Obstáculo es 0 no hay efecto de este valor

Distancia Obstáculo

Valor	Representación	Observaciones
0	No hay obstáculo	
1	Obstáculo a 50 m o +	Si Posición Obstáculo es 0 no hay efecto de este valor
-1	Obstáculo a 50 m o -	Si Posición Obstáculo es 0 no hay efecto de este valor

Las acciones de los motores del ROV serán:

Acción	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Avanzar	1	1	0	0
Retroceder	-1	-1	0	0
Giro derecho	1	0	0	0
Giro izquierdo	0	1	0	0
Inmersión	0	0	1	1
Emersión	0	0	-1	-1

Tabla 3: Acciones de los Motores

Las señales simuladas que representan la salida del controlador PID y del sonar para la detección de obstáculos deberían pasar antes de ingresar la red neuronal por sendos convertidores que le asignen el valor correspondiente de acuerdo a la Tabla 1.

Gráficamente lo podemos ver de esta manera:

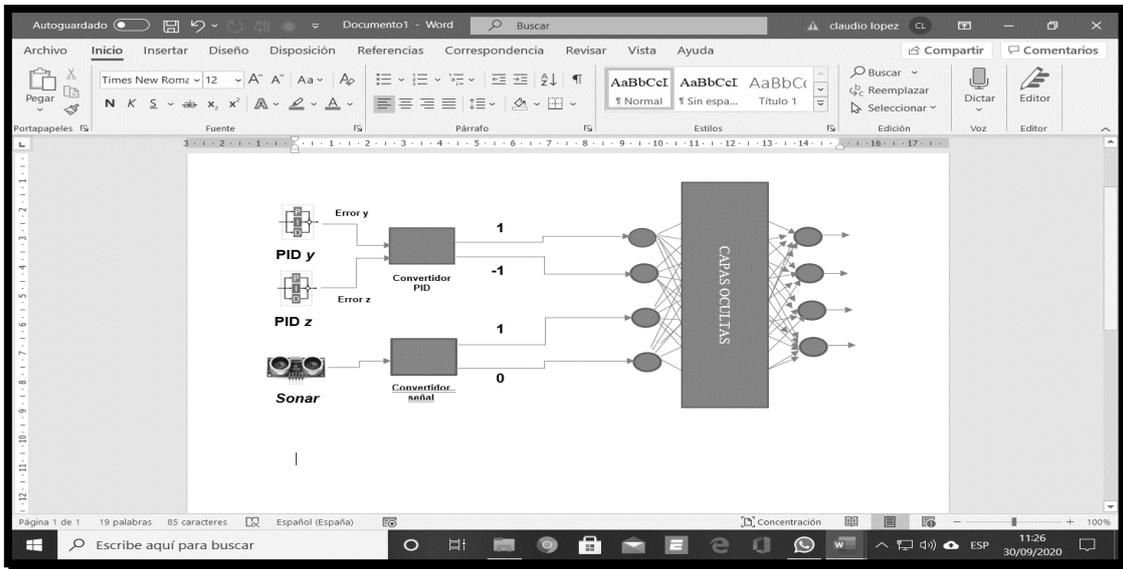


Figura 2: Esquema de la red neuronal

El código de la red en tensorflow será el siguiente para una red de 1 capa oculta

En las Figuras 3 a 7 se muestra el Código empleando una red de 1 capa oculta.

```

import numpy as np
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
import matplotlib.pyplot as plt

# model
model = tf.keras.Sequential([
    keras.layers.Flatten(input_shape=[1,4]),
    keras.layers.Dense(16, activation=tf.nn.tanh),
    keras.layers.Dense(4, activation=tf.nn.tanh)])

model.compile(optimizer="sgd", loss="mean_squared_error", metrics = ['accuracy'])

xs = np.array([[0,0,0,0],[0,0,0,1],[0,0,0,-1], [0,0,1,0],[0,0,1,1],[0,0,1,-1],[0,0,-1,0],[0,0,-1,1],[0,0,-1,-1],[0,1,0,0],
[1,0,0,-1],[1,0,1,0],[1,0,1,1],[1,0,0,1],[-1,0,0,1],[-1,0,0,-1],[-1,0,1,0],[1,0,1,-1], [1,0,-1,0],[1,0,-1,1],
[1,0,-1,-1],[1,1,0,0], [1,1,0,1],[1,1,0,-1],[-1,0,1,1],[-1,0,1,-1], [-1,0,-1,0],[-1,0,-1,1],[-1,0,-1,-1],
[-1,1,0,0],[-1,1,0,1]])

ys = np.array([[0,0,0,0],[0,0,0,0],[0,0,0,0],[0,0,0,0],[0,1,1,1],[-1,-1,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],
[-1,-1,0,0],[0,0,1,1],[0,0,1,0],[0,1,0,0],[0,1,0,0],[1,0,0,0],[-1,-1,0,0],[1,0,0,0],
[-1,-1,0,0],[0,1,0,0],[1,0,0,0],[1,-1,0,0],[0,0,1,1],[0,0,1,1],[0,0,1,1],[0,0,1,1],
[1,0,0,0],[-1,-1,0,0],[1,0,0,0],[1,0,0,0],[-1,-1,0,0],[0,0,1,1],[0,0,1,1]])

```

Figura 3

```

model.summary()

Model: "sequential_8"
-----
Layer (type)                Output Shape              Param #
-----
flatten_12 (Flatten)        (None, 4)                 0
dense_24 (Dense)            (None, 16)                80
dense_25 (Dense)            (None, 4)                 68
-----
Total params: 148
Trainable params: 148
Non-trainable params: 0

history = model.fit(xs,ys,epochs=1000)

Epoch 1/1000
WARNING:tensorflow:Model was constructed with shape (None, 1, 4) for input Tensor("flatten_12_input:0", shape=(None, 1, 4), dtype=float32)
WARNING:tensorflow:Model was constructed with shape (None, 1, 4) for input Tensor("flatten_12_input:0", shape=(None, 1, 4), dtype=float32)
1/1 [-----] - 0s 2ms/step - loss: 0.6544 - accuracy: 0.1000
Epoch 2/1000
1/1 [-----] - 0s 2ms/step - loss: 0.6508 - accuracy: 0.0667
Epoch 3/1000
1/1 [-----] - 0s 1ms/step - loss: 0.6473 - accuracy: 0.0667

```

Figura 4

```

print(history_dict.keys())
dict_keys(['loss', 'accuracy'])

acc = history.history['accuracy']
loss = history.history['loss']

epochs = range(1, len(loss) + 1, 1)

plt.plot(epochs, acc, 'b', label='Validation acc')
plt.title('Training and validation accuracy')
plt.ylabel('acc')
plt.xlabel('epochs')

plt.legend()
plt.figure()

plt.plot(epochs, loss, 'r--', label='Validation loss')
plt.title('Training and validation loss')
plt.ylabel('loss')
plt.xlabel('epochs')

plt.legend()

```

Figura 5

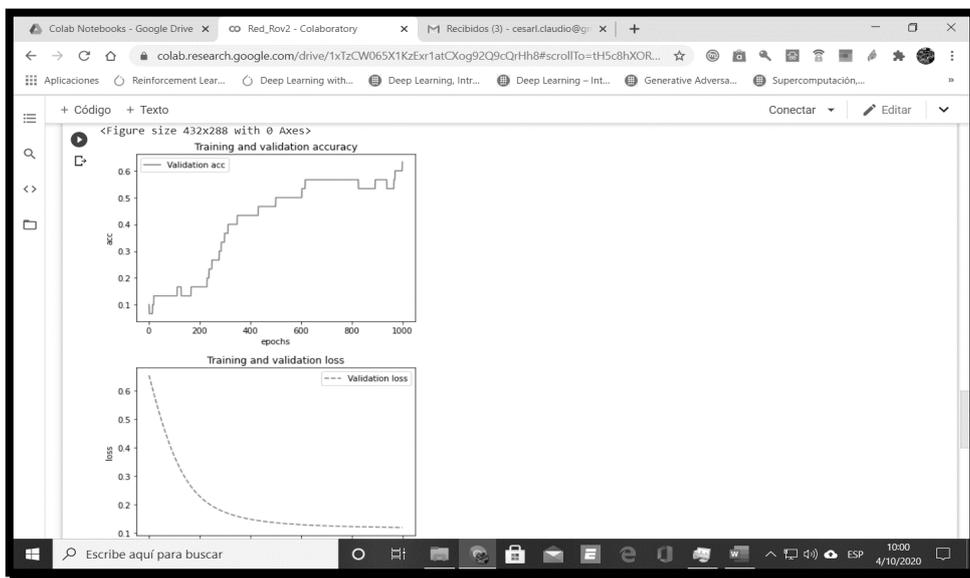


Figura 6

```

test_loss = model.evaluate(xs, ys)
test_acc = model.evaluate(xs, ys)
#print(test_loss, test_acc)
print('Test accuracy:', test_acc)

WARNING:tensorflow:Model was constructed with shape (None, 1, 4) for input Tensor("Flatten_12_input:0", shape=(None, 1, 4), dtype=float32)
1/1 [====] - 0s 5ms/step - loss: 0.1192 - accuracy: 0.6333
1/1 [====] - 0s 2ms/step - loss: 0.1192 - accuracy: 0.6333
Test accuracy: [0.1192190945148468, 0.6333333253860474]

predictions= model.predict([[0,0,1,0]])
print(predictions)

[[-0.16492532 -0.06188553  0.10479999  0.16211158]]

```

Figura 7

El código de la red en tensorflow será el siguiente para una red de 3 capas oculta.

En las Figura 8 a 12 se muestra el Código empleando una red de 3 capas ocultas.

```
[1] import numpy as np
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
import matplotlib.pyplot as plt

[19] #Model.
model=tf.keras.Sequential([
keras.layers.Flatten(input_shape=[1,1]), keras.layers.Dense(16, activation=tf.nn.tanh), keras.layers.Dense(16, activation=tf.nn.tanh),
keras.layers.Dense(8, activation=tf.nn.tanh), keras.layers.Dense(4, activation=tf.nn.tanh)])

model.compile(optimizer="sgd",loss="mean_squared_error",metrics = ['accuracy'])

[20] xs= np.array([[0,0,0,0],[0,0,0,1],[0,0,0,-1], [0,0,1,0],[0,0,1,1],[0,0,1,-1],[0,0,-1,0],[0,0,-1,1],[0,0,-1,-1],[0,1,0,0],
[1,0,0,-1],[1,0,1,0],[1,0,1,1],[1,0,0,1],[1,0,0,-1],[1,0,1,0],[1,0,1,-1], [1,0,-1,0],[1,0,-1,1],
[1,0,-1,-1],[1,1,0,0], [1,1,0,1],[1,1,0,-1],[1,0,1,1],[1,0,1,-1], [-1,0,-1,0],[-1,0,-1,1],[-1,0,-1,-1],
[-1,1,0,0],[-1,1,0,1]])

ys= np.array ([[0,0,0,0],[0,0,0,0],[0,0,0,0],[0,0,0,0],[0,1,1,1],[-1,-1,0,0],[0,0,0,0],[1,0,0,0],
[-1,-1,0,0],[0,0,1,1],[1,-1,0,0],[0,-1,0,0],[0,1,0,0],[1,0,0,0],[1,-1,0,0],[1,0,0,0],[1,0,0,0],[1,-1,0,0],
[-1,-1,0,0],[0,1,0,0],[1,0,0,0],[1,-1,0,0],[0,0,1,1],[0,0,1,1],[-1,-1,0,0],
[1,0,0,0],[1,-1,0,0],[1,0,0,0],[1,0,0,0],[1,-1,0,0],[0,0,1,1],[0,0,1,1]])

ys.shape
(30, 4)

[21] model.summary()
```

Figura 8

```
[21] model.summary()

Model: "sequential_3"
-----
Layer (type) Output Shape Param #
-----
flatten_3 (Flatten) (None, 4) 0
dense_8 (Dense) (None, 16) 80
dense_9 (Dense) (None, 16) 272
dense_10 (Dense) (None, 8) 136
dense_11 (Dense) (None, 4) 36
-----
Total params: 524
Trainable params: 524
Non-trainable params: 0

[22] history = model.fit(xs,ys,epochs=4000)

1/1 [=====] - 0s 6ms/step - loss: 0.0624 - accuracy: 0.7667
Epoch 3972/4000
1/1 [=====] - 0s 7ms/step - loss: 0.0624 - accuracy: 0.7667
Epoch 3973/4000
1/1 [=====] - 0s 8ms/step - loss: 0.0624 - accuracy: 0.7667
Epoch 3974/4000
1/1 [=====] - 0s 6ms/step - loss: 0.0624 - accuracy: 0.7667
Epoch 3975/4000
1/1 [=====] - 0s 8ms/step - loss: 0.0624 - accuracy: 0.7667
Epoch 3976/4000
1/1 [=====] - 0s 7ms/step - loss: 0.0624 - accuracy: 0.7667
```

Figura 9

```
[23] history_dict = history.history
print(history_dict.keys())

dict_keys(['loss', 'accuracy'])

acc = history.history[ 'accuracy' ]
loss = history.history[ 'loss' ]
epochs = range(1,len(loss)+1,1)

plt.plot( epochs, acc, 'b', label='Validation acc' )
plt.title('Training and validation accuracy')
plt.ylabel('acc')
plt.xlabel('epochs')

plt.legend()
plt.figure()

plt.title('Training and validation accuracy')
plt.plot( epochs, loss, 'r--', label='Validation loss')
plt.title('Training and validation loss' )
plt.ylabel('loss')
plt.xlabel('epochs')

plt.legend()
plt.figure()
```

Figura 10

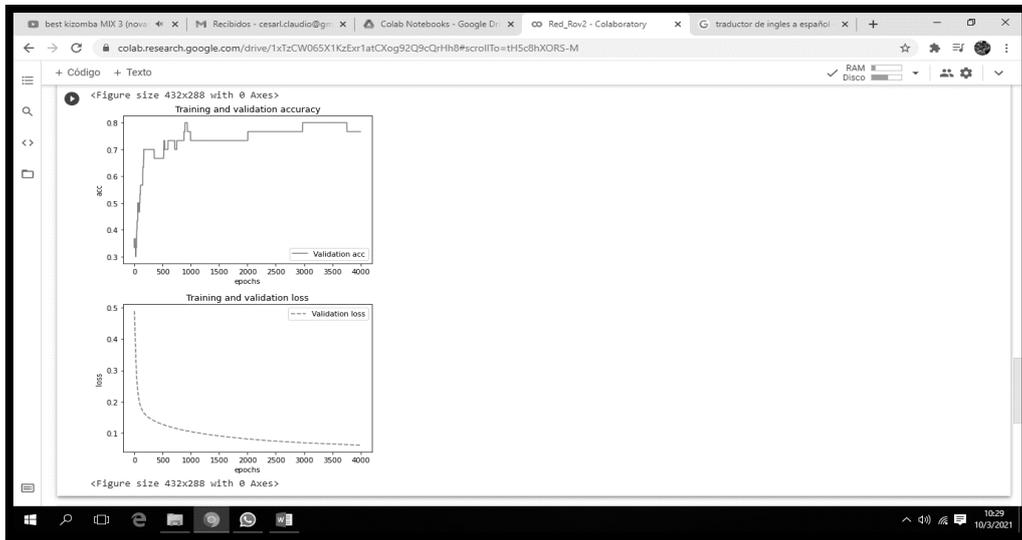


Figura 11

```

[25] test_loss = model.evaluate(xt, ys)
      test_acc = model.evaluate(xs, ys)
      print(test_loss, test_acc)
      print("Test accuracy:", test_acc)
WARNING:tensorflow:Model was constructed with shape (None, 1, 4) for input KerasTensor(type_spec=TensorSpec(shape=(None, 1, 4), dtype=tf.float32, name='flatten_3
1/1 [=====] - 0s 112ms/step - loss: 0.0622 - accuracy: 0.7667
1/1 [=====] - 0s 12ms/step - loss: 0.0622 - accuracy: 0.7667
Test accuracy: [0.062217965722084045, 0.7666666666720997]

[26] predictions = model.predict([[0,0,1,0]])
      print(predictions)
WARNING:tensorflow:Model was constructed with shape (None, 1, 4) for input KerasTensor(type_spec=TensorSpec(shape=(None, 1, 4), dtype=tf.float32, name='flatten_3

```

Figura 12

3. Resultados

En este punto ya se ha entrenado la red neuronal y ahora se puede evaluar cómo se comporta con datos nuevos de prueba.

```

[26] predictions = model.predict([[0,0,1,0]])
      print(predictions)
[[0.08181588 0.3103801 0.12181609 0.12174464]]

```

Figura 13: Datos de validación del modelo

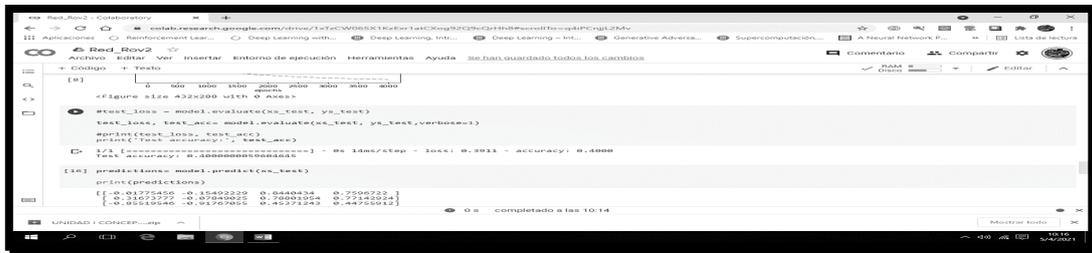


Figura 14: Evaluación de Datos de validación del modelo

Se puede apreciar en la Figura 14 que el valor obtenido de la evaluación de los datos de validación corresponde a un porcentaje del 40%. Los resultados de la predicción de los mencionados datos se muestran en la Figura 15.

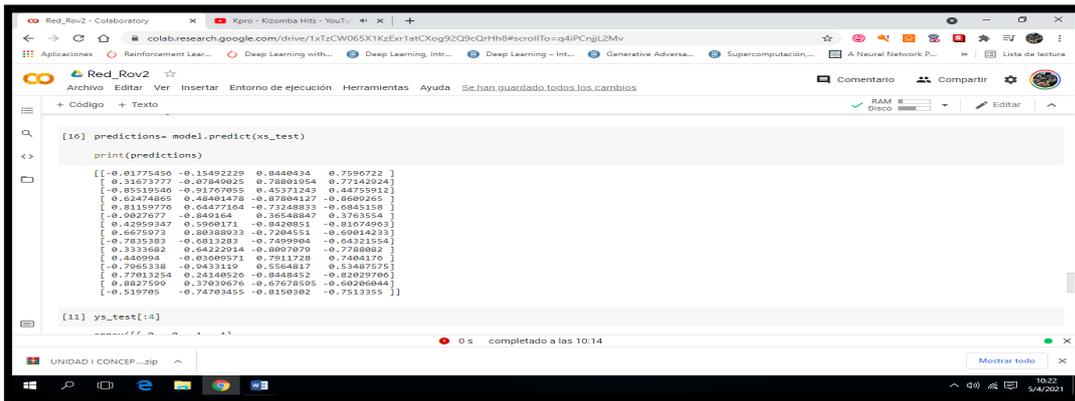
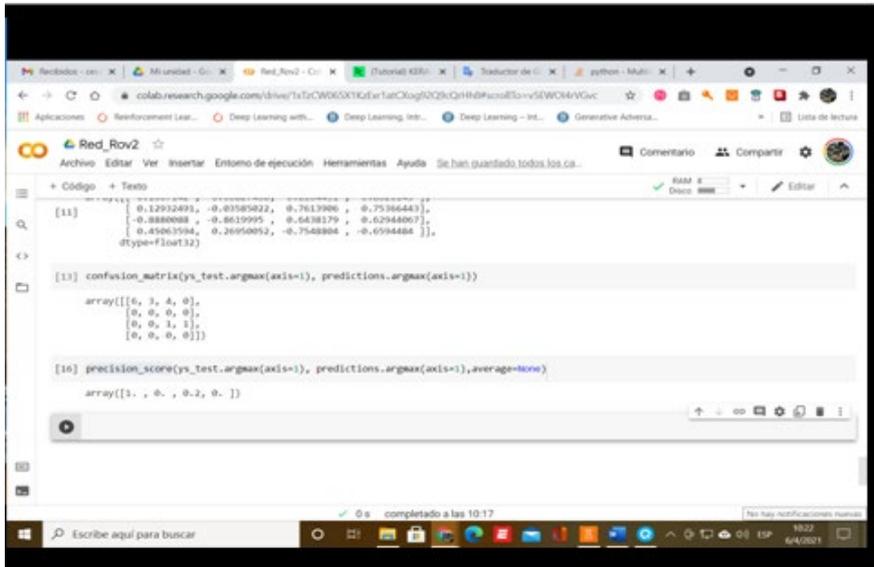


Figura 15: Predicción de Datos de validación del modelo

Otras herramientas de evaluación que se emplearon fueron la matriz de confusión que permite visualizar en una tabla las predicciones correctas e incorrectas realizadas. Idealmente, solo verá números en la diagonal, lo que significa que todas sus predicciones fueron correctas. En este caso las predicciones están repartidas lo que coincide con el resultado de la evaluación de la función *model.evaluate*

La función precisión *precision_score* es una medida de la exactitud de un clasificador. Cuanto mayor sea la precisión, más preciso será el clasificador. En nuestro caso se muestra un array con valores de precisión extremos en algunos casos dependiendo de la posición del dato de predicción.



```
[11] array([[0.1292493, -0.03185822, 0.7617996, 0.75366443],
        [-0.3886088, -0.8619975, 0.5438279, 0.62944067],
        [0.45063594, 0.26950952, -0.7548884, -0.6994484 ]],
        dtype=float32)

[13] confusion_matrix(y_test.argmax(axis=1), predictions.argmax(axis=1))

array([[6, 3, 4, 0],
       [0, 0, 0, 0],
       [0, 0, 1, 1],
       [0, 0, 0, 0]])

[16] precision_score(y_test.argmax(axis=1), predictions.argmax(axis=1), average='none')

array([1. , 0. , 0.2, 0. ])
```

Figura 16: Funciones de evaluación

De lo investigado, surge que:

- 1- Si bien las redes neuronales se emplean para el manejo de una cuantiosa cantidad de datos, su paradigma puede ser empleado para otros problemas como el presentado en este documento. La ventaja es la menor complejidad en la programación.
- 2- Se realizaron dos experiencias con profundidades de redes distintas, concluyéndose de que a más capas y más neuronas por capa, las curvas de precisión y perdidas de ven favorecidas, por lo que los resultados se aproximan a los deseados y la navegación sería más adecuada.
- 3- La evaluación de la red con datos de validación realizada en la segunda red nos permite inferir que el modelo tiene una precisión del 40% por lo que habrá que repensar la composición de la red para incrementar el valor de esta característica

4. Conclusiones

El sistema de navegación de una plataforma autónoma subacua como un ROV necesita un adecuado control para su traslado de una posición a otra, teniendo en cuenta el medio en que se desempeña. Las corrientes marinas o los obstáculos no previstos (cardúmenes, cables o redes de pesca, etc.), ocasionan inconvenientes de operación que se hacen incontrolables a medida que el dispositivo se sumerge haciendo difícil llevar a cabo la misión, entre otras cosas por al arrastre que sufre su cable umbilical más allá de cierta

profundidad. Las soluciones a este problema han sido asignarle más autonomía al ROV, manteniendo una unión física con este de otras maneras.

Esta autonomía se podrá dar aplicando a su sistema de control un paradigma de aprendizaje automático. En nuestro caso formalizado a través de una red neuronal entrenada montada sobre una placa Arduino cuya salida será una señal para cada uno de los motores del ROV. Esta salida se podrá modificar en función del tipo de propulsión que tenga el ROV. Como entradas hemos pensado en dos dispositivos controladores PID también montados sobre placas Arduino que permitan la percepción de las diferencias entre el curso dado al ROV y el verdadero que este siga. Estos controladores obrarán sobre los ejes de movimiento vertical y horizontal, accionando sobre las hélices del ROV para estabilizarlo, una vez obtenidos el resultado de la red neuronal.

Asimismo, hemos incorporado un sonar que posibilite la detección de obstáculos y reúna datos que ayuden a tener un panorama exterior del desplazamiento del ROV. La red neuronal puede, entonces, ser más certera en cuanto al mantenimiento efectivo del control autónomo.

Las pruebas de este algoritmo, al principio, se realizarán sobre un sistema de simulación al cual se le modificarán algunos parámetros sobre el vehículo representado en pantalla para que pueda moverse de acuerdo a lo que indique la red neuronal. Con esto se podrá después aplicarlo a una prueba real.

1. Angeles, J., Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms., New York, Berlin: Springer, 2007.
2. Brandt, D., Comparison of A* and RRT-Connect Motion Planning Techniques for Self-Reconfiguration Planning., Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, Vol., Oct. 2006, pp.892-897.
3. Bresina, J.L., Jónsson, A.K., Morris, P.H., Rajan, K., Activity planning for the mars exploration rovers., 15th International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2005, pp. 40-49.
4. Carsten, J., Rankin A., Ferguson D., Stentz A., Global planning on the Mars Exploration Rovers: Software integration and surface testing., J. Field Robot., Vol. 26, No. 4, 2009, pp. 337-357.
5. Choset, H., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki, L., Thrun, S., Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation., Cambridge, Mass.: MIT Press, 2005.
6. Cortes, J., Jaillet, L., Simeon, T., Disassembly Path Planning for Complex Articulated Objects., Robotics, IEEE Transactions on, Vol.24, No.2, April 2008a, pp.475- 481.
7. Cortes, J., Jaillet, L., Simeon, T., Transition-based RRT for path planning in continuous cost spaces., Intelligent Robots and Systems, 2008, IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, 22-26 Sept. 2008b, pp.2145- 2150.
8. Craig, J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control., Addison-Wesley, 1989. Funge, J.D., Artificial intelligence for computer games: an introduction., Wellesley, Mass.: Peters, 2004.
9. Goldberg, K., Planar Robot Simulator with Obstacle Avoidance (Configuration Space)., Disponible en: <http://ford.ieor.berkeley.edu/cspace/>.
10. Goldman, A., Path planning problems and solutions., in Book Path planning problems and solutions, Series Path planning problems and solutions, Vol.1, 1994, pp. 105-108.
11. Goo Bong, C., Soo Gang, L., Sungmin, K., Byung-Ju, Y., Whee- Kuk, K., Se Min, O., Young Soo, K., Jong, I.I.P., Seong Hoon, O., A robot-assisted surgery system for spinal fusion., in Book A robot-assisted surgery system for spinal fusion, Series A robot-assisted surgery system for spinal fusion, 2005, pp. 3015-3021.
12. Hsu, D., Randomized single-query motion planning in expansive spaces., PhD thesis, Department of Computer Science, Stanford University, 2000, Automation Science and Engineering, 2008. CASE 2008, IEEE International Conference on, Aug. 2008, pp.41-46, 23-26.
13. Jijie, X., Duindam, V., Alterovitz, R., Goldberg, K., Motion planning Lozano-Pérez, T., Automatic planning of manipulator transfer movements., IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics SMC-11, No. 110, 1981, pp. 681-689-681-689.

14. Maio, D., Rizzi, S., CICERO: An Assistant for Planning Visits to a Museum., Lecture notes in computer science, No. 978, 1995, pp. 564, 1995.
15. Sim, C., Wan Sing, N., Ming Yeong, T., Yong-Chong, L., Tseng Tsai, Y., Image-guided manipulator compliant surgical planning methodology for robotic skull-base surgery., in Book Image-guided manipulator compliant surgical planning methodology for robotic skull-base surgery, Series Image guided manipulator compliant surgical planning methodology for robot-icskull-base surgery, pp. 26-29, 2001.
16. Duncan, F. "ROV Motion Control System". Oslo: tesis doctoral. 2014
17. Hector A. Moreno , Roque Saltaren, Lisandro Puglisib, Isela Carrerabc, Pedro Cardenasbd, Cesar ´ Alvarez, . "Robotica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control. Science Direct, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial . 2014
18. Herry S. Kenyon , "Robo boats on Horizon", En: Revista SIGNAL del mes de Septiembre del 2009, pags 23-26.
19. Rita Boland , "Vehicles Flies Rapidly into the Next Generation", En: Revista SIGNAL del mes de Septiembre del 2009, pags 27-30.
20. Angeles, J., Fundamentals of robotic mechanical systems: theory, methods, and algorithms., New York, Berlin: Springer, 2007.
21. Brandt, D., Comparison of A* and RRT-Connect Motion Planning Techniques for Self-Reconfiguration Planning., Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, Vol., Oct. 2006, pp.892-897.
22. Bresina, J.L., Jónsson, A.K., Morris, P.H., Rajan, K., Activity planning for the mars exploration rovers., 15th International Conference on Automated Planning and Scheduling, pp. 40-49, 2005.
23. Choset, H., Lynch, K., Hutchinson, S., Kantor, G., Bur-Gard, W., Kavraki, L., Thrun, S., Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation., Cambridge, Mass.: MIT Press, 2005.
24. Cortes, J., Jaillet, L., Simeon, T., Transition-based RRT for path planning in continuous cost spaces., Intelligent Robots and Systems, 2008, IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on, 22-26 Sept. 2008b, pp.2145- 2150.
25. Craig, J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control., Addison-Wesley, 1989. Funge, J.D., Artificial intelligence for computer games: an introduction., Wellesley, Mass.: Peters, 2004.
26. Goldberg, K., Planar Robot Simulator with Obstacle Avoidance (Configuration Space)., Disponible en: <http://ford.ieor.berkeley.edu/cspace/>.
27. Goldman, A., Path planning problems and solutions., in Book Path planning problems and solutions, Series Path planning problems and solutions, Vol.1, 1994, pp. 105-108.
28. Goo Bong, C., Soo Gang, L., Sungmin, K., Byung-Ju, Y., Whee- Kuk, K., Se Min, O., Young Soo, K., Jong, I.I.P., Seong Hoon, O., A robot-assisted surgery system for spinal fusion., in Book A robot-assisted surgery system for spinal fusion, Series A robot-assisted surgery system for spinal fusion, 2005, pp. 3015-3021.

29. Hsu, D., Randomized single-query motion planning in expansive spaces., PhD thesis, Department of Computer Science, Stanford University, 2000, Automation Science and Engineering, 2008. CASE 2008, IEEE International Conference on, Aug. 2008, pp.41–46, 23–26.
30. JIJIE, X., DUINDAM, V., ALTEROVITZ, R., GOLDBERG, K., Motion planning Lozano-Pérez, T., Automatic planning of manipulator transfer movements., IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics SMC-11, No. 110, 1981, pp. 681–689– 681–689.
31. Sim, C., Wan Sing, N., Ming Yeong, T., Yong-Chong, L., Tseng Tsai, Y., Image-guided manipulator compliant surgical planning methodology for robotic skull-base surgery., in Book Image-guided manipulator compliant surgical planning methodology for robotic skull-base surgery, Series Image guided manipulator compliant surgical planning methodology for robotic skull-base surgery, pp. 26-29, 2001.
32. S. Russel, P.Norvig, Prentice Hall, "Artificial Intelligence: A modern Approach" 2nd edition, 2002.
33. D. Polle, A. Mackworth, R. Goebel, "Computation Intelligence: A logical Approach", 2nd edition, Oxford University Press, 2003
34. Volker Bertram "Unmanned Surface Vehicles – A survey" Disponible en http://www.skibstekniskelskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Download%20materiale/2008/10%20marts%2008/USVsurvey_DTU.pdf Fecha de consulta: 04/03/2011
35. Mr. B. Beeson, Mr. C. Hillenbrand "Development of the Anti- Submarine Warfare Unmanned Surface Vehicle (ASW USV) Engineering Developmental Model to Meet US Navy Needs", Disponible en: http://www.gdrs.com/about/profile/pdfs/UDTPacific2006_4A3.pdf Fecha de consulta: 11/03/2011
36. J. Keller "Unmanned underwater vehicles take advantage of advance sensors and processors for navigation and artificial intelligence" Disponible en: <http://www.militaryaerospace.com/index/display/article-display/336352/articles/military-aerospace-electronics/exclusive-content/video-unmanned-under> Fecha de consulta: 11/03/2011
37. Nejeh Nasri (1), Laurent Andrieux (2), Abdennaceur Kachouri (1), and Mounir SameT (1) Behavioral Modeling and Simulation of Underwater Channel LETI-ENIS, B.P.868-3018- SFAX-TUNISIA ;(2)LATTIS-IUT BLAGNAC TOULOUSE – FRANCE, 2009
38. Mohd Rizal Arshad And Mohamed Yusof Radzak . Design and Development of an Autonomous Underwater Vehicle Test-Bed (USM-AUV I). Underwater Robotics Research Group (URRG), School of Electrical and Electronic Engineering, University Science of Malaysia (USM), Engineering Campus, 14300 Seberang Prai Selatan, Pulau Pinang MALAYSIA, 2004
39. Manh Hung V., Indoor Navigation System for Handheld Devices. A Major Qualifying Project Report submitted to the faculty of the Worcester Polytechnic Institute Worcester, Massachusetts, USA in partial fulfillment of the re-

quirements of the Degree of Bachelor of Science on this day of October 22, 2009

40. Rolf Christensen, Nikolaj Fogh. Inertial Navigation System. Master project Section of Automation and Control Department of Electronic Systems Faculty of Engineering, Science and Medicine Fredrik Bajers Vej 7 C3 DK-9220 Aalborg Øst Denmark, 2008

41. Kalangi Pullarao Prasanth. Modelling and Simulation of an Underwater Acoustic Communication Channel. Tesis Hochschule Bremen University of applied sciences Bremen, Germany, 2004

INTRODUCCIÓN	1
VEHÍCULOS SUBMARINOS AUTÓNOMOS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. ANTECEDENTES DE LOS AUVs.....	6
3. CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS SUMERGIBLES AUTÓNOMOS	8
3.1. Vehículos Submarinos Operados Remotamente, ROVs.....	9
3.2. Vehículos Submarinos Autónomos, AUVs.	9
3.3. Vehículos Submarinos Autónomos para Intervenciones, IAUVs.....	10
4. COMPONENTES DE LOS AUV	11
4.1. La estructura y el diseño	11
4.2. Sensores e instrumentación	13
4.3. Sensores para orientación y comunicaciones.....	15
4.4. Sistemas de Visión.....	16
4.5. Sistemas de propulsión	16
4.6. Fuentes de Energía.....	17
5. EVOLUCIÓN DEL MANEJO DE LOS VEHÍCULOS AUTÓNOMOS SUBMARINOS, AUVs.....	17
6. INNOVACIÓN EN LA TECNOLOGÍA AUV	18
6.1. Los Vehículo Submarino Autónomo de clase ligera (LAUV)	18
7. EL FUTURO DE LOS AUV	21
8. BIBLIOGRAFÍA.....	23
MODELADO DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO.....	32
1. INTRODUCCIÓN	32
2. CINEMÁTICA DE UN VEHÍCULO SUBMARINO AUTÓNOMO	33
2.1. Ecuaciones cinemáticas.....	34
2.2. Matriz de Rotación.....	36
2.3. Velocidad lineal del AUV	39
2.4. Velocidad angular del AUV	40
3. DINÁMICA DE VEHÍCULOS SUBMARINOS	42
3.1. Ecuaciones de movimiento.....	43
3.2. Movimiento general de un AUV.....	48
4. EL AMORTIGUAMIENTO HIDRODINÁMICO.....	53
4.1. Términos hidrostáticos.....	55
5. DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO EXPERIMENTAL	57
5.1. Descripción del movimiento del vehículo.....	59
6. RESULTADOS OBTENIDOS	68
7. CONCLUSIONES.....	69
8. REFERENCIAS.....	70
SIMULACIÓN CON MATLAB Y SIMULINK DE UN MODELO DE UAV	72
1. ANTECEDENTES.....	72
2. CONSIDERACIONES SOBRE EL MODELO QUE SE UTILIZÓ	73
3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	76
4. ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS	81
5. CONCLUSIONES.....	88
6. BIBLIOGRAFÍA.....	89

SISTEMAS DE CONTROL PARA USO EN CUADRÓPTEROS Y AUUVS.....	96
1. INTRODUCCIÓN.....	96
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CONTROLADO.....	96
3. DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL MÁS UTILIZADOS.....	99
3.1. Sistema de control Proporcional e Integral más Derivada (PID) (LINEAL).....	103
3.2. Sistemas de Control lineal cuadrático gaussiano (LQR/G) (LINEAL).....	105
3.3. Sistemas de control por Modo deslizante (SMC) (NO LINEAL).....	109
3.4. Sistemas de control Backstepping (Integrator) (NO LINEAL).....	112
3.5. Sistemas de control por algoritmos Adaptativos (NO lineales).....	115
3.6. Sistemas de control mediante algoritmos de Control Robusto (NO LINEAL).....	118
3.7. Sistemas de control mediante algoritmos de Control Óptimo (LINEAL y NO LINEAL).....	121
3.8. Sistemas de control mediante algoritmos de linealización de la realimentación (FL) (No lineal)	125
3.9. Control mediante sistemas de Control de Lógica Difusa (CLD) (No lineal).....	129
3.10. Control mediante sistemas de Redes Neuronales (No lineal).....	133
3.11. Sistemas de Control mediante algoritmos Híbridos.....	137
4. COMPARACIÓN DE ALGORITMOS.....	139
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	142
6. BIBLIOGRAFÍA.....	143
CONTROL DE LA NAVEGACIÓN DE UN UAV UTILIZANDO UNA ARQUITECTURA BASADA EN UNA RED NEURONAL	152
1. INTRODUCCIÓN.....	152
2. COMPARACIÓN DE SENSORES.....	155
2.1. Sensores ultrasónicos.....	155
2.2. Sensores Lidar.....	156
2.3. Sensores de radiofrecuencia.....	156
2.4. Sensor de flujo óptico.....	157
2.5. Sistemas de seguimiento de movimiento por cámara.....	157
3. ARQUITECTURA GNC.....	158
3.1. Arquitectura de Hardware.....	158
3.2. Arquitectura de software.....	159
3.3. Comparación con la arquitectura tradicional GNC.....	160
4. EXPERIMENTOS REALIZADOS.....	161
5. CREACIÓN DE UN CONJUNTO DE DATOS PERSONALIZADOS EN LA ARQUITECTURA CNN.....	163
5.1. Conjunto de Datos.....	163
5.2. Entrenamiento.....	164
5.3. Algoritmo de Navegación.....	165
6. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS.....	165
7. CONCLUSIONES.....	167
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168
CONTROL DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA SUBACUA EMPLEANDO REDES NEURONALES	170
1. INTRODUCCIÓN.....	170
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	172
3. RESULTADOS.....	180
4. CONCLUSIONES.....	182
5. REFERENCIAS.....	184
ÍNDICE.....	188

Vehículo submarino autónomo

Un enfoque práctico

Alejandro Héctor Molina, Mabel Noemí Bottoni, Horacio Mario Simonetti, Ernesto Castagnet, Germán Fernández Madarieta, Claudio Cesar Lopez.

El presente libro es una compilación de trabajos realizados en el transcurso de las tareas de investigación llevadas a cabo por el Grupo de investigación sobre Desarrollo de Herramientas Computacionales para Ingeniería, Organización y Enseñanza (GDHC) de la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional, dentro del Proyecto de Investigación de la Universidad de la Defensa Nacional (UNDEF): Desarrollo de un modelo de control autónomo para una plataforma sumergible operada remotamente empleando técnicas de inteligencia artificial.

Se presentan algunos de los trabajos representativos de las tareas que se realizaron:

- Vehículos Submarinos Autónomos
- Modelado de un Vehículo Autónomo Subacuático
- Simulación con Matlab y Simulink de un modelo de UAV
- Sistemas de control para uso en cuadcópteros y AUV
- Control de la Navegación de un UAV utilizando una Arquitectura Basada en una Red Neuronal
- Control de Navegación Autónoma Subacua empleando Redes Neuronales

Estos trabajos describen tareas dentro de la investigación que antes señalamos y que se comparten en este libro con la intención de ayudar a quienes deban realizar tareas similares o para que se pueda dimensionar la realización de proyectos similares.