

Validación de ley de guiado para vehículos autónomos de superficie

Manuel Gantiva Osorio *, Guillermo Bejarano, Pablo Millán Gata

Departamento de Ingeniería, Universidad Loyola Andalucía, Avda. de las Universidades, nº 2, 41704, Sevilla, España

To cite this article: Gantiva, M., Bejarano, G., Millán, P. 2025. Guidance Law Validation for Autonomous Surface Vehicles. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 22, 93-103. <https://doi.org/10.4995/riai.2024.21949>

Resumen

Este artículo presenta la integración y validación experimental de una ley de guiado de línea de visión con estimación de estados en vehículos autónomos de superficie (ASVs), cuyo uso creciente en ambientes marítimos requiere de soluciones de control avanzadas. La investigación aborda el seguimiento de camino, un método comúnmente empleado que no tiene restricciones de tiempo y permite una convergencia precisa a la trayectoria parametrizada deseada. El esquema de control propuesto integra un observador de estado no lineal y un controlador de velocidad PID. Mediante distintas métricas estadísticas se verifica que los resultados experimentales del controlador implementado en un ASV real (Yellowfish) mantienen los errores de seguimiento dentro de umbrales aceptables. Aunque existen desafíos en cuanto a la dinámica de los vehículos y la incidencia de las perturbaciones, el control de seguimiento demostró estabilidad y robustez. Se sugieren futuras mejoras, como la incorporación de un controlador de velocidad más robusto y el uso de estimaciones de perturbaciones para mejorar el rendimiento global del controlador.

Palabras clave: Navegación, guiado y control de sistemas marinos, Vehículos autónomos de superficie; Sensores y actuadores, Control no lineal y óptimo de sistemas marinos, Arquitecturas de control en sistemas marinos.

Guidance Law Validation for Autonomous Surface Vehicles

Abstract

This article presents the integration and experimental validation of a line-of-sight guidance law with state estimation on autonomous surface vehicles (ASVs), whose increasing use in maritime environments demands advanced solutions. The research focuses on path following, a commonly employed method without time constraints that allows precise convergence to the desired parameterized path. The proposed control scheme integrates a non-linear state observer and a PID speed controller. Various statistical metrics verify that the experimental results of the controller, implemented on a real ASV (Yellowfish), keep tracking errors within acceptable thresholds. Although there are challenges regarding vehicle dynamics and the impact of disturbances, the tracking control demonstrated stability and robustness. Future improvements are suggested, such as incorporating a more robust speed controller and using disturbance estimates to enhance the controller performance.

Keywords: Marine system navigation guidance and control, Autonomous surface vehicles, Sensors and actuators, Nonlinear and optimal marine system control, Control architectures in marine systems.

1. Introducción

El aumento en el uso y desarrollo de vehículos de superficie en los últimos años es un claro indicador del impacto e importancia que estos robots marítimos han adquirido en diversas aplicaciones. La versatilidad de estos sistemas permite

su uso en entornos con condiciones desfavorables para equipos a gran escala, así como para actividades repetitivas que puedan ser ejecutadas de manera óptima por un equipo de drones autónomos (Zereik et al., 2018). Esta tendencia creciente ha llevado a un aumento paralelo en la investigación y los algoritmos de control para este tipo de vehículos. Sin embargo, la dinámi-

*Autor para correspondencia: megantiva@uloyola.es

ca e incertidumbres asociadas con su modelado, que afectan al rendimiento de los controladores, siguen siendo uno de los desafíos más significativos en su despliegue.

El funcionamiento de estos vehículos autónomos y su incorporación en entornos de exploración, transporte o monitoreo presenta varios retos. Trabajos como el presentado por Bonache Seco et al. (2017), donde se desarrolla un centro de control de tierra para vehículos, demuestran la importancia de desarrollar tecnologías que permitan mejorar la integración con estos nuevos agentes. De manera similar, Cerrada Collado et al. (2023) proponen una ley de control óptima que permite la recuperación de vehículos autónomos submarinos en caso de fallo en uno de sus motores. Asimismo, el control mixto para el seguimiento de trayectoria expuesto por Vacca Sisterna et al. (2021) considera los cambios en la masa de los vehículos. Los trabajos mencionados se enfocan en mejorar la adaptación y el despliegue de los vehículos autónomos con el fin de contribuir a su integración en misiones reales.

Aunque cada aplicación o tarea que involucra Vehículos Autónomos de Superficie (ASV) presenta desafíos únicos, uno de los enfoques más comúnmente empleados es el seguimiento de camino. A diferencia del seguimiento de trayectoria con restricciones de tiempo, el seguimiento de camino solo busca converger al camino parametrizado mientras el vehículo se mueve a una velocidad de avance deseada (Peng et al., 2020). Este enfoque puede ser utilizado en tareas como monitoreo o limpieza, donde la variación del tiempo no es crucial y se da mayor énfasis a la ejecución precisa de la actividad.

La arquitectura convencional para los controladores de seguimiento de camino se basa en un sistema en cascada. En este sistema, el controlador de alto nivel calcula las referencias para el ángulo de rumbo y la velocidad de avance basándose en los errores de seguimiento de camino, mientras que el controlador de bajo nivel se centra en manipular los actuadores para cumplir con las referencias previamente calculadas (Bibuli et al., 2009). Existen principalmente tres tipos de algoritmos de guiado: guiado de persecución pura (PP), guiado de rumbo constante (CB) y guiado por línea de visión (LOS), cada uno con sus propias ventajas y desventajas (Gu et al., 2022). Entre estos, el guiado LOS es particularmente notable. Trabajos como los de Borhaug et al. (2008) y Lekkas and Fossen (2014) implementan guiado integral LOS para trayectorias lineales y curvilíneas, respectivamente, mientras que Fossen et al. (2014) proponen guiado adaptativo LOS.

Se han propuesto diversas estrategias de control para la ley de guiado, siendo la conocida ley de guiado LOS, implementada y validada en simulación por Breivik and Fossen (2005), una de las más efectivas para seguir trayectorias rectas o curvas en ausencia de corrientes oceánicas y perturbaciones en vehículos subactuados. Sin embargo, en los últimos años, y basándose en la experiencia de navegantes, estas estrategias han sido mejoradas para responder a cambios en la marea o el viento. Estrategias como el guiado LOS compuesto propuesto por Miao et al. (2017), o el guiado LOS basado en observador de estado extendido implementado por Liu et al. (2017) y Yu et al. (2019), se basan en la arquitectura original, añadiendo mayor robustez al estimar y compensar el ángulo de deslizamiento causado por perturbaciones externas que varían con el tiempo. Además, se han desarrollado nuevas versiones que no solo consideran las

perturbaciones externas, sino que también incluyen la dinámica del barco y su diseño, aplicándose variantes de la ley de guiado en veleros (Deng et al., 2020).

En cuanto al control de bajo nivel, con el objetivo de rechazar perturbaciones y compensar la incertidumbre en el modelado, se han propuesto distintos enfoques. Entre estos destacan métodos adaptativos paramétricos implementados por Skjetne et al. (2005), control por modos deslizantes (Chen et al., 2016), y control de lógica difusa y redes neuronales (Wang et al., 2019). Sin embargo, dichos enfoques requieren un modelado preciso en la mayoría de los casos, lo cual dificulta su implementación en validación real y puede ser un factor de error. Por esta razón, este trabajo utiliza un control PID de bajo nivel que no requiere de un modelo preciso y fue ajustado experimentalmente. No obstante, se reconoce la importancia de implementar controladores más robustos en la capa de bajo nivel en el futuro cercano para mejorar el desempeño del sistema en general.

Asimismo, uno de los desafíos de la implementación y validación experimental es la medición de velocidades y perturbaciones. Algunas de las soluciones propuestas en la literatura incluyen el uso de observadores de estado, que permiten la estimación de estados no medibles basándose en mediciones de posición y orientación. El observador implementado en este trabajo es el propuesto por Bejarano et al. (2022), el cual ha sido validado con datos experimentales por Morel et al. (2022a) e implementado por Gantiva et al. (2024). Una de sus principales características es la estimación de perturbaciones generalizadas y la consideración de ruido en las mediciones del sistema de posicionamiento global (GPS).

Por lo tanto, la integración de observadores de estado en los esquemas de control para el seguimiento de camino es una herramienta crucial que permite el uso de menos sensores y también habilita la estimación de perturbaciones que pueden alterar el comportamiento del controlador. El esquema propuesto en este trabajo se basa en el propuesto y validado mediante simulación por Bejarano and Sufiyan (2020), con diferencias significativas relacionadas con el uso de un observador que considera ruido en las mediciones GPS, así como la inclusión de un controlador PID de bajo nivel. Este último fue ajustado experimentalmente sin requerir un modelo previamente identificado. Este artículo aborda la implementación de una estrategia de control completa para el seguimiento preciso de caminos rectos y curvilíneos, validada en el Parque del Alamillo en Sevilla, con un enfoque especial en la evaluación del rendimiento del controlador a través del análisis detallado de los errores de seguimiento de camino.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 presenta la descripción del ASV, incluyendo los equipos instalados en el ASV y sus características, además de abordar la arquitectura del software utilizado para la implementación del controlador y el observador. La Sección 3 analiza el modelo utilizado y detalla la estrategia de estimación empleada. La Sección 4 describe el guiado por línea de visión guiada por avance (SGLOS). La Sección 5 proporciona ejemplos que ilustran los resultados experimentales para tres circuitos diferentes, en los cuales se variaron velocidades y parámetros del controlador, realizando posteriormente una comparación estadística. Finalmente, la Sección 6 resume las conclusiones y propone trabajos futuros.

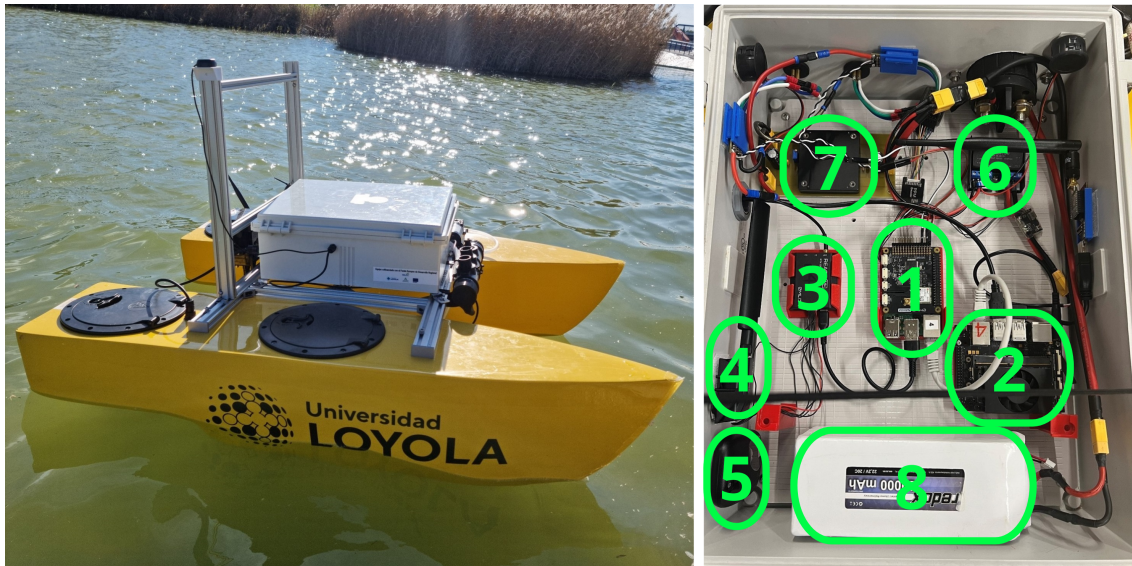


Figura 1: El ASV Yellowfish y su hardware

2. Descripción del ASV

La plataforma ASV en la que se programaron y validaron los algoritmos descritos en este documento es el Yellowfish ASV (Morel et al., 2022b), desarrollado por el grupo de investigación Optimización y Control de Sistemas Distribuidos de la Universidad Loyola Andalucía¹. Este vehículo tipo catamarán está equipado con dos propulsores BlueRobotics T200 para el control del vehículo, lo cual lo convierte en un sistema subacuado, ya que solo tiene dos entradas de control para los tres grados de libertad considerados en un ASV.

En cuanto al hardware del ASV, está equipado con dos ordenadores de placa reducida: una Raspberry Pi 4 con un módulo Navio2 y una Jetson Xavier Nx. El uso de este módulo facilitó la integración de varios sensores y el control de actuadores a través del software ArduPilot (ArduPilot-Dev-Team, 2024), el cual fue instalado y configurado en la Raspberry Pi. Sin embargo, el uso de este software y las capacidades de computación de la Raspberry Pi limitaron la integración e implementación de controladores más complejos, como el seguimiento de caminos o la coordinación de flotas.

Por esta razón, se ha instalado un segundo ordenador de placa reducida, la Jetson Xavier Nx, equipado con un sistema en chip de NVIDIA que incluye una GPU CUDA. Además, ofrece una potencia de procesamiento significativamente mayor, lo que la hace ideal para cargas de trabajo de procesamiento intensivo y aplicaciones de inteligencia artificial. Asimismo, cuenta con una variedad de puertos de conectividad capaces de soportar cámaras y sensores de alta resolución, haciéndolo más versátil para la implementación de controladores de alto nivel. La Figura 1 muestra y enumera los componentes con los que está equipado el ASV, mientras que la Tabla 1 lista cada uno de los componentes.

En cuanto al software, la plataforma seleccionada para programar el algoritmo de control y el observador de estado fue Robot Operating System 2 (ROS2) Humble (Macenski et al.,

2022). Este sistema ofrece una arquitectura modular orientada a servicios, facilitando la creación, integración y depuración eficiente y escalable de componentes de control. Además, su soporte para comunicación segura y distribuida permite la implementación de sistemas de control robustos y flexibles, capaces de operar en entornos heterogéneos y distribuidos. Asimismo, la naturaleza de código abierto de ROS2 promueve la colaboración y reutilización de código, ya sea en C++ o Python, proporcionando mayor flexibilidad y facilidad en la adaptación y mejora de algoritmos de control. Aunque ROS2 Humble es compatible con distintos sistemas operativos, se utilizó Docker para crear un contenedor basado en Ubuntu 22.04 con el objetivo de facilitar su integración en la Jetson Xavier, que utiliza el sistema operativo basado en Ubuntu 20.04. La Figura 2 muestra una descripción del software utilizado en cada una de las computadoras de placa reducida.

Tabla 1: Componentes del Yellowfish ASV

Numero	Componente
1	Raspberry Pi 4 modelo B y Navio2
2	Jetson Xavier NX
3	Módulo GPS
4	Antena LoRa GPS
5	Módem WiFi
6	Regulador de Voltaje 12 V
7	Regulador de Voltaje 16 V para propulsores
8	Batería Li-Po 20000 mA 22,2 V

Finalmente, se empleó el paquete MAVROS, diseñado para facilitar la comunicación entre sistemas basados en ROS2 y plataformas de control de vuelo con ArduPilot. Este paquete actúa como un puente entre ambos software, simplificando el desarrollo de sistemas robóticos al proporcionar una interfaz de comunicación estándar y robusta, compatible con el protocolo de comunicación Mavlink y todos sus comandos.

¹<https://www.uloyola.es/oferta-cientifica/grupos-de-investigacion/optimization-and-control-of-distributed-systems>

Entre las ventajas que ofrece este paquete se encuentran la publicación de datos de telemetría, el control remoto y la configuración de parámetros en tiempo real. Para asegurar la integridad de los datos, ambos ordenadores se conectaron mediante un cable Ethernet en una red local, garantizando una comunicación estable y fiable entre los sistemas, esencial para el correcto funcionamiento de los algoritmos de control y observación implementados.

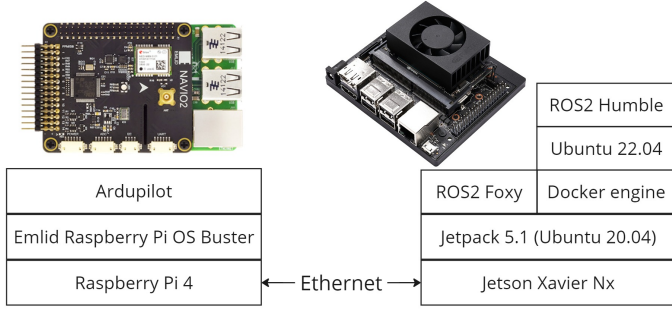


Figura 2: Software utilizado en las computadoras de placa reducida

3. Observador no lineal de estado extendido

El observador de estado extendido implementado en este trabajo es el propuesto por Bejarano et al. (2022), que utiliza el modelo presentado por Fossen (2011), ampliamente aceptado y utilizado en estrategias de control y estimación.

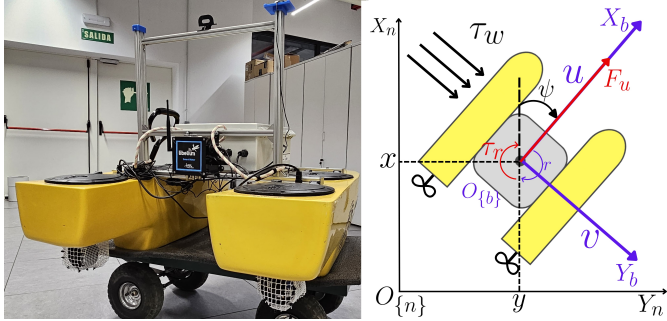


Figura 3: El ASV Yellowfish y los marcos de referencia del modelo

La cinemática y la cinética de un ASV que se desplaza en un plano horizontal se modelan, según (Fossen, 2011), como (1):

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v \\ M\dot{v} = -C(v)v - D(v)v - g(\eta) + \tau_w + \tau, \end{cases} \quad (1)$$

donde $\eta = [x, y, \psi]^T$ es el vector de posición y orientación sobre el plano expresado en el marco inercial fijo a la Tierra $\{n\}$ mostrado en la Figura 3, $v = [u, v, r]^T$ es el vector de velocidades lineales y angular expresadas en el marco de referencia fijo al cuerpo del vehículo $\{b\}$, $\tau = [F_u, 0, \tau_r]^T$ se refiere al vector de fuerza y par, que representa las acciones de control, también expresado en $\{b\}$, y $\tau_w = [F_{w,u}, F_{w,v}, \tau_{w,r}]^T$ se refiere a las fuerzas y par ambientales debidos al viento, las olas y las corrientes.

M es la matriz de inercia definida como (2), la cual es simétrica y no diagonal, lo que ocasiona que las acciones de

control de fuerza y par afecten las velocidades en los tres grados de libertad. $C(v)$ es la matriz de Coriolis y fuerzas centrífugas, $D(v)$ la matriz de amortiguamiento, y $g(\eta)$ describe las fuerzas gravitacionales y de flotación. La matriz rotacional $R(\psi)$ entre los marcos de referencia $\{b\}$ y $\{n\}$ está dada por (3):

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_2(\psi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

A partir de (1), se define el vector de perturbaciones generalizadas agrupadas en (4), de tal forma que se agrupen efectos hidrodinámicos, dinámicas internas no modeladas, incertidumbres y perturbaciones externas en un único término.

$$\sigma \equiv M^{-1} [-C(v)v - D(v)v - g(\eta) + \tau_w]. \quad (4)$$

De acuerdo a (4), la dinámica del ASV puede ser reescrita como (5):

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v \\ \dot{v} = M^{-1}\tau + \sigma, \end{cases} \quad (5)$$

Una de las principales características de este observador es que solo utiliza mediciones de posición y orientación para estimar velocidades y perturbaciones generalizadas agrupadas, permitiendo un enfoque robusto en una prueba de validación experimental.

Este observador presenta una estructura en cascada, dividida en dos partes. La primera parte estima la dinámica posicional no lineal como se muestra en (6), mientras que la segunda parte estima la dinámica rotacional no lineal como se describe en (7). El vector de estado para la parte posicional se define como $X_p \equiv [\eta_p, v_p, \sigma_p]^T$ siendo \hat{X}_p el valor estimado, donde $\eta_p \equiv [x, y]^T$, $v_p \equiv [u, v]^T$ y $\sigma_p \equiv [\sigma_u, \sigma_v]^T$. Por otro lado, el vector de estado para la parte rotacional se define como $X_\psi \equiv [\psi, r, \sigma_r]^T$ siendo \hat{X}_ψ el valor estimado. Es importante señalar que x e y son las posiciones Norte y Este en metros con respecto al marco de referencia inercial, u es la velocidad de avance (*surge*), v es la velocidad lateral (*sway*), r es la velocidad angular (*yaw*) y σ_u , σ_v y σ_r representan las perturbaciones generalizadas que afectan a las aceleraciones lineales y rotacional, respectivamente, mientras que los términos y_p e y_ψ denotan las mediciones de posición y orientación, considerándose que la primera está afectada por ruido.

$$\dot{\hat{X}}_p = A_p(\psi)\hat{X}_p + B_p\tau + L_p(\psi)(y_p - C_p\hat{X}_p) \quad (6)$$

$$\dot{\hat{X}}_\psi = A_\psi\hat{X}_\psi + B_\psi\tau + L_\psi(y_\psi - C_\psi\hat{X}_\psi) \quad (7)$$

Las matrices dinámicas posicionales y rotacionales $A_p(\psi)$, C_ψ , A_ψ y C_p pueden obtenerse mediante manipulación directa de las ecuaciones dinámicas del modelo presentado por Fossen (2011) y están dadas por las ecuaciones (8) y (9), respectivamente, donde $R_2(\psi)$ corresponde a la sub matriz 2×2 de la matriz rotacional original $R(\psi)$ y $I_{2 \times 2}$ a la matriz identidad de dimensiones apropiadas.

$$A_p(\psi) = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & R_2(\psi) & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, C_p = \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_\psi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, C_\psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Mientras tanto, B_ψ and B_p son matrices dependientes de los términos de la matriz de inercia M , como se muestra en (10), donde M_p^{-1} corresponde a las dos primeras filas de la inversa de la matriz de inercia, y M_ψ^{-1} corresponde a la última fila. Por otro lado, τ representa el vector de fuerza/par definido previamente en el modelo.

$$B_p = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 3} \\ M_p^{-1} \\ 0_{2 \times 3} \end{bmatrix}, B_\psi = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 3} \\ M_\psi^{-1} \\ 0_{1 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sin embargo, dado que los valores de la matriz de inercia del ASV Yellowfish no están disponibles, se realizó una identificación de la ganancia de entrada IG para cada grado de libertad. Esto puede definirse como el impacto de las acciones de control, las cuales son las señales PWM, sobre el cambio de velocidad, y se utilizó en el observador para sustituir los términos desconocidos de B en función de $\bar{\delta}$ y $\Delta\delta$, que corresponden al promedio y la diferencia de las señales PWM normalizadas de ambos propulsores, respectivamente, como se muestra en (11).

$$B_p \tau = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ IG_u(\bar{\delta}, \Delta\delta) \\ IG_v(\bar{\delta}, \Delta\delta) \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}, B_\psi \tau = \begin{bmatrix} 0 \\ IG_r(\bar{\delta}, \Delta\delta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

La identificación de la ganancia de entrada se calculó utilizando las señales PWM normalizadas de los propulsores izquierdo y derecho como entradas, asumiendo que son idénticas, y aplicando una función estática cuadrática como se muestra en (12), donde a, b, c y d representan los coeficientes de la ecuación y $q \in \{u, v, r\}$. Se empleó una versión discretizada de las ecuaciones de velocidad para calcular estas ganancias. Posteriormente, se realizó la identificación de coeficientes para cada uno de los grados de libertad utilizando el método de mínimos cuadrados con datos experimentales obtenidos durante pruebas específicas del vehículo Morel et al. (2023).

$$IG_q(\bar{\delta}, \Delta\delta) = a_q \left(\bar{\delta}^2 + \frac{\Delta\delta^2}{4} \right) + b_q \bar{\delta} \Delta\delta + c_q \bar{\delta} + d_q \frac{\Delta\delta}{2} \quad (12)$$

Finalmente, el cálculo de la ganancia constante del observador rotacional L_ψ se realiza en (13), donde P_ψ y W_ψ forman parte de la solución a un problema de optimización basado en Desigualdades Matriciales Lineales (LMI), con un parámetro de ajuste. De manera similar, el cálculo de la ganancia del observador posicional $L_p(\psi)$ está definido por (14), donde las matrices constantes P_p y W_p forman parte de la solución a otro problema de optimización basado en LMI, con tres parámetros

de ajuste para su diseño y donde T_p está dada por (15). Se remite al lector interesado al trabajo de Bejarano et al. (2022) para detalles adicionales sobre el diseño y ajuste del observador.

$$L_\psi = -P_\psi^{-1} W_\psi, \quad (13)$$

$$L_p(\psi) = -T_p^{-1} P_p^{-1} W_p R_2^T(\psi), \quad (14)$$

$$T_p(\psi) = \begin{bmatrix} R_2(\psi) & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

4. Guía de línea de visión guiada por avance (SGLOS)

En la Figura 4 se muestra un camino η_p , parametrizado con respecto a una variable s , con el marco de referencia $\{F\}$ tangencial a la trayectoria en el punto objetivo virtual (x_p, y_p) y rotado por γ_p respecto al marco de referencia Inercial $\{n\}$. La velocidad total U sobre el barco es el vector resultante de las velocidades de avance y lateral con respecto al marco de referencia del cuerpo del ASV. El ángulo β corresponde al ángulo de dicho vector con respecto al eje X_b y es conocido como el ángulo de deslizamiento lateral, que es provocado por el incremento del sway debido a perturbaciones externas o a la propia dinámica del barco. El error de desviación lateral y_e y el error de desviación longitudinal x_e se definen con respecto a $\{F\}$ como sigue en (16):

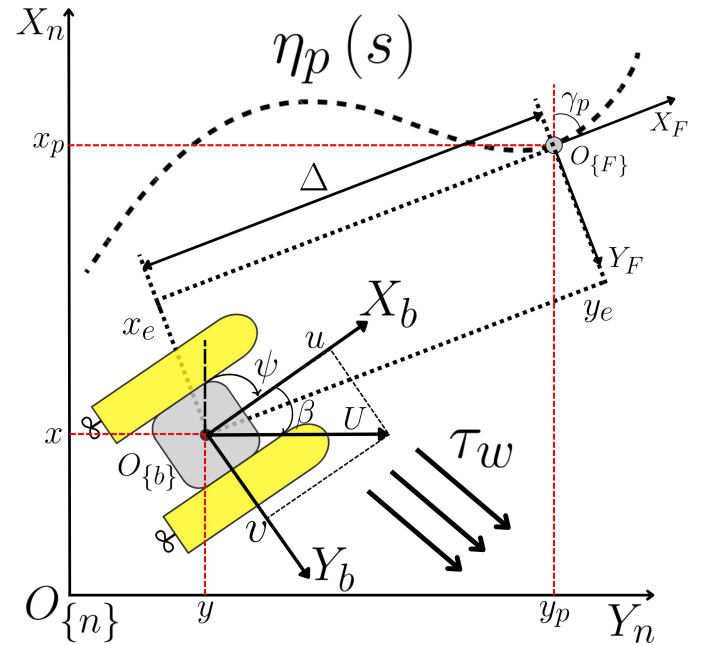


Figura 4: Geometría de control de seguimiento de camino

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_p & -\sin \gamma_p \\ \sin \gamma_p & \cos \gamma_p \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x - x_p \\ y - y_p \end{bmatrix} \quad (16)$$

Wang et al. (2019) proponen un control de guía de línea de visión guiada por avance (SGLOS), el cual tiene como objetivo

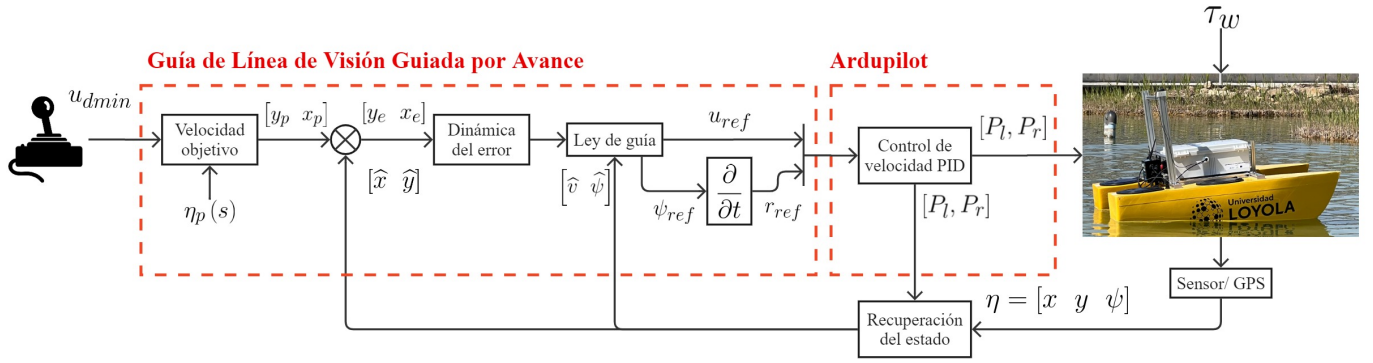


Figura 5: Estrategia completa de control de seguimiento de caminos

llevar los errores de seguimiento de camino a cero y está dividido en dos partes. La ley de orientación está gobernada por (17):

$$\psi_{ref} = \gamma_p - \beta_{ref} - \arctan\left(\frac{y_e}{\Delta}\right), \quad (17)$$

Mientras tanto, la ley de guía de surge está diseñada como:

$$u_{ref} = k_1 \sqrt{y_e^2 + \Delta^2}, \quad (18)$$

donde $\Delta > 0$ es la distancia de anticipación. Además, k_1 se define como $k_1 = u_{dmin}/\Delta$, donde u_{dmin} es la velocidad deseada al alcanzar el camino. Finalmente, la ley de guía del punto objetivo virtual sobre el camino se define como:

$$u_{tar} = k_2 x_e + U_{ref} \cos(\psi - \gamma_p + \beta_{ref}), \quad (19)$$

donde $k_2 > 0$ es un parámetro ajustable, $\beta_{ref} = \text{atan}(v/u_{ref})$ es el llamado ángulo de deslizamiento lateral deseado y $U_{ref} = \sqrt{u_{ref}^2 + v^2}$ es la velocidad total deseada. Por último y basado en lo anterior se calcula la tasa de cambio de la variable parametrizada como se muestra en (20):

$$\dot{s} = \frac{u_{tar}}{\sqrt{\left(\frac{\partial x_p}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_p}{\partial s}\right)^2}} \quad (20)$$

La estrategia de control implementada se muestra en la Figura 5, donde las posiciones estimadas, la orientación y la velocidad lateral (*sway*) se utilizan como entradas para el control SGLOS. Además, se utiliza el control integrado de velocidad en ArduPilot como controlador de bajo nivel, el cual es una combinación de dos controladores PID ajustados experimentalmente. Estos controladores fueron configurados y probados siguiendo las instrucciones de ArduPilot-Dev-Team (2024), sin embargo a continuación se explican las ganancias y parámetros ajustados.

Primeramente, fue ajustado el controlador de velocidad de giro, el cual cuenta con 4 parámetros: ganancia FF_g , o mejor conocida ganancia de retroalimentación anticipada, y las tres ganancias P_g , I_g y D_g del controlador PID, por otra parte, para el controlador de velocidad de avance fue el segundo en ser ajustado, este únicamente cuenta con las tres ganancias P_u , I_u y D_u , sin embargo para este controlador fue necesario configurar como un parámetro adicional la aceleración máxima A_{max} .

Dado que la ley de guía solo genera referencias de orientación y el controlador de bajo nivel recibe solo velocidades

angulares, se implementó un filtro derivativo de primer orden para obtener la velocidad angular de referencia (giro). Además, las salidas del controlador ArduPilot son $[P_l, P_r]$, que son las señales PWM correspondientes a los propulsores izquierdo y derecho, respectivamente.

5. Validación experimental

En esta sección se evalúan y analizan los resultados de la estrategia de control presentada en la sección anterior en términos de su capacidad para seguir circuitos cerrados como se muestra en la Figura 6, los cuales están compuestos por i trayectorias definidas como T_i . A través de un análisis estadístico de los errores transversales y longitudinales, se evalúan diferentes velocidades de referencia y varios valores de Δ (distancia de anticipación).

Las pruebas se realizaron con un ASV Yellowfish en el Lago de los Patos, ubicado en el Parque del Alamillo, Sevilla, en horas de la mañana bajo la presencia de perturbaciones de viento y corriente. Los datos GPS se obtuvieron y transformaron a un marco de referencia local con respecto al punto de origen en latitud $37^\circ 25' 8.97''$ N y longitud $5^\circ 59' 56.37''$ O, asegurando que, en cada uno de los ejercicios realizados, la posición inicial y la orientación del ASV fueran las mismas. Las métricas estadísticas utilizadas para evaluar los diferentes ejercicios incluyen la media, el error cuadrático medio (MSE), la desviación media absoluta (MAD) y el porcentaje de tiempo dentro del umbral (PTU) para el error transversal.

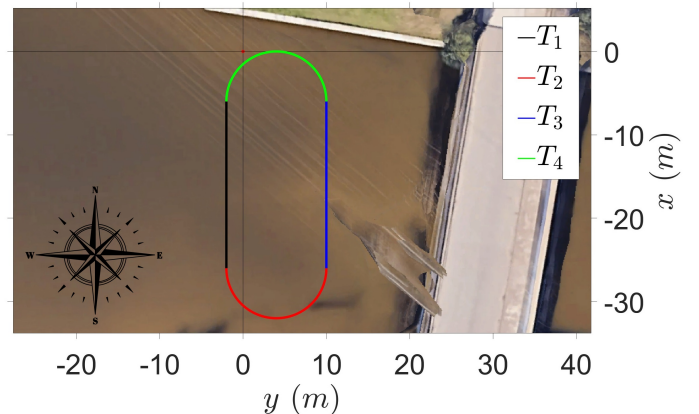


Figura 6: Circuito cerrado con arcos circulares de 6 metros de radio

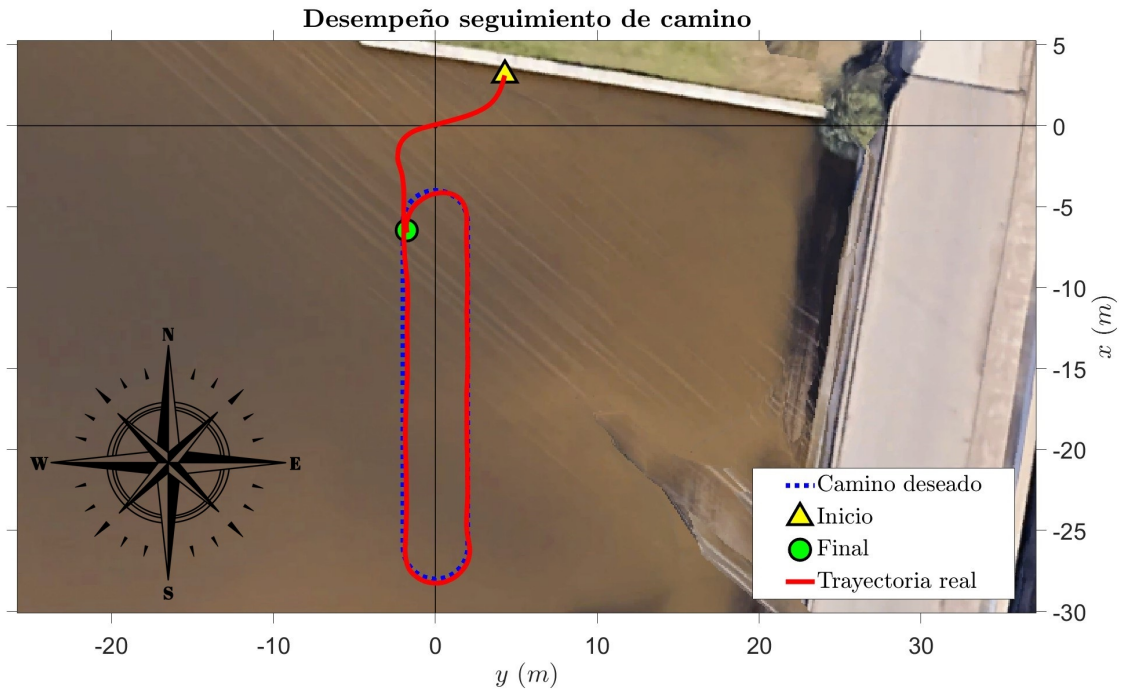


Figura 7: Circuito cerrado con arcos circulares de 2 metros de radio

Abordando con más detalle la implementación de la estrategia de control propuesta, la Tabla 2 muestra los valores de los parámetros utilizados en cada uno de los ejercicios descritos a continuación. Se incluyen los parámetros ajustados experimentalmente para el controlador de bajo nivel, los coeficientes de las ganancias de entrada para los tres grados de libertad identificados mediante el método de mínimos cuadrados y, finalmente, las soluciones para los problemas de optimización basados en LMI. Aquí, $L_{\psi}^{(i)}$ corresponde al i -ésimo elemento de la matriz de ganancias para el observador rotacional y $Q_p = P_p^{-1}W_p$, donde $Q_p^{(i,j)}$ corresponde al elemento en la fila i y la columna j de la matriz de ganancias para el observador posicional. Es importante resaltar que los valores de aquellos subíndices que no se incluyeron en la Tabla 2 son iguales a 0.

Tabla 2: Valores experimentales de los parámetros de control y observación

Param	Valor	U	Param	Valor	U
FF_g	1.2	-	P_u	0.6	-
P_g	0.6	-	I_u	0.6	-
I_g	0.6	-	D_u	0.6	-
D_g	0.6	-	A_{max}	0.5	-
a_u	-0.01451	m/s^2	c_v	-0.00328	m/s^2
b_u	0.0	m/s^2	d_v	-0.05058	m/s^2
c_u	0.14031	m/s^2	a_r	-0.0872	rad/s^2
d_u	0.0	m/s^2	b_r	-0.07431	rad/s^2
a_v	0.00924	m/s^2	c_r	0.08143	rad/s^2
b_v	-0.03811	m/s^2	d_r	0.32069	rad/s^2
$L_{\psi}^{(1)}$	10.3704	-	$Q_p^{(1,1)}$	6.6507	-
$L_{\psi}^{(2)}$	42.7625	-	$Q_p^{(2,2)}$	6.6507	-
$L_{\psi}^{(3)}$	76.0083	-	$Q_p^{(1,3)}$	9.4091	-
$Q_p^{(4,2)}$	9.4091	-	$Q_p^{(5,1)}$	4.5999	-
$Q_p^{(6,2)}$	4.5999	-			

La primera curva utilizada fue una línea recta desde el origen hacia el sur de 35 metros de longitud, donde $u_{dmin} = 0.5$ m/s, $k_2 = 2$, y el valor de Δ se varió para analizar el efecto de este parámetro en los errores de seguimiento. La Tabla 3 muestra las métricas estadísticas para tres valores diferentes de Δ con un umbral de 0.3 m para el PTU y los tiempos de recorrido, los cuales fueron validados mediante el valor de la variable parametrizada s al alcanzar el punto final de la trayectoria. Observamos que para un valor de 0.5 m, el error y_e aumenta significativamente y el controlador no logra alcanzar la trayectoria durante la duración de la prueba.

Por otro lado, es evidente que aumentar el valor de Δ mejora el rendimiento del controlador, haciendo que el error se acerque a cero y se mantenga dentro de un rango de error menor. Sin embargo, si este parámetro se incrementa demasiado, el vehículo tardará más en alcanzar el punto de referencia y responder a los cambios en el camino. Por lo tanto, se decidió que el valor más adecuado para los siguientes ensayos sería $\Delta = 1.0$ m, permitiendo mantener un umbral de error bajo sin comprometer el tiempo necesario para alcanzar la referencia.

Tabla 3: Métricas estadísticas para diferentes valores de Δ

Δ (m)	Tiempo (s)	Media y_e (m)	MAD y_e (m)	MSE y_e (m ²)	PTU (%)
0.5	44.20	0.8994	1.3916	2.3668	0.37
1.0	75.80	0.1579	0.5857	0.9635	86.12
2.0	70.70	0.1202	0.6073	1.0518	87.99

El segundo ensayo utilizó el circuito mostrado en la Figura 6, el cual está compuesto por cuatro segmentos: dos líneas rectas paralelas de 25 metros cada una, junto con dos semicírculos de 6 metros de radio. El ejercicio consistió en dar tres vueltas al circuito, variando el valor de u_{dmin} para cada vuelta. Los va-

lores constantes de los parámetros fueron $\Delta = 1.0$ m y $k_2 = 2$. La Tabla 4 presenta las métricas estadísticas para cada vuelta con un umbral de 0.1 m para el PTU y los tiempos de recorrido, los cuales fueron validados mediante el valor de la variable parametrizada s al alcanzar el punto final del circuito.

El análisis de las métricas estadísticas del ejercicio de variar u_{dmin} revela el impacto de este parámetro en el rendimiento del controlador. Esto se debe principalmente a la dinámica del ASV: con una velocidad de avance alta, al intentar girar aumenta la velocidad lateral, causando un efecto de deslizamiento en las curvas. Sin embargo, el controlador puede responder a esto y corregir la trayectoria, haciendo que el error tienda nuevamente a cero.

Tabla 4: Métricas estadísticas para diferentes valores de u_{dmin} circuito 1

u_{dmin} (m/s)	Tiempo (s)	Media y_e (m)	MAD y_e (m)	MSE y_e (m ²)	PTU (%)
0.5	133.70	0.0382	0.0557	0.0040	92.10
0.75	85.50	0.0242	0.0501	0.0053	84.92
1.0	79.50	0.0254	0.0618	0.0075	75.28

Continuando con los ensayos, se definió una nueva trayectoria con una composición similar a la anterior, pero esta vez con semicírculos de 2 metros de radio para evaluar el rendimiento del controlador en caminos con mayor curvatura. El ejercicio consistió en dar dos vueltas al circuito, variando el valor de u_{dmin} para cada vuelta. Los valores constantes de los parámetros fueron los mismos que en el ejercicio anterior. La Tabla 5 presenta las métricas estadísticas para cada vuelta con un umbral de 0.1 m para el PTU y los tiempos de recorrido, los cuales fueron validados mediante el valor de la variable parametrizada s al alcanzar el punto final en cada vuelta al circuito.

Tabla 5: Métricas estadísticas para diferentes valores de u_{dmin} circuito 2

u_{dmin} (m/s)	Tiempo (s)	Media y_e (m)	MAD y_e (m)	MSE y_e (m ²)	PTU (%)
0.5	168.00	0.0591	0.3837	0.8858	19.19
0.3	204.00	-0.2076	0.2697	0.7063	57.12

La Figura 7 presenta el seguimiento del segundo circuito con $u_{dmin} = 0.3$ m/s. Este circuito representa un desafío mayor para el controlador, por lo que se requiere una velocidad mínima más baja para que el efecto sobre la velocidad lateral no afecte significativamente el error. La Figura 8 muestra los errores de seguimiento junto con la estimación del sway \hat{v} para este circuito, donde se observa cómo el controlador puede reducir los errores a cero y responder a aumentos en la velocidad lateral, buscando minimizarla a lo largo del camino y haciendo que esta tienda a cero.

Adicionalmente, se identificó que los puntos más críticos en las trayectorias son los momentos en los que se finaliza la curva y se retoma la trayectoria recta. En estos intervalos de tiempo, se observa un claro sobrepico en la velocidad de giro e incremento en el error de seguimiento, causados principalmente por la velocidad lateral generada por la dinámica del ASV. Este fenómeno es rápidamente corregido por la ley de control. En particular, para el circuito de la Figura 7, este efecto se manifiesta en el intervalo de tiempo entre los 110 y 160 segundos.

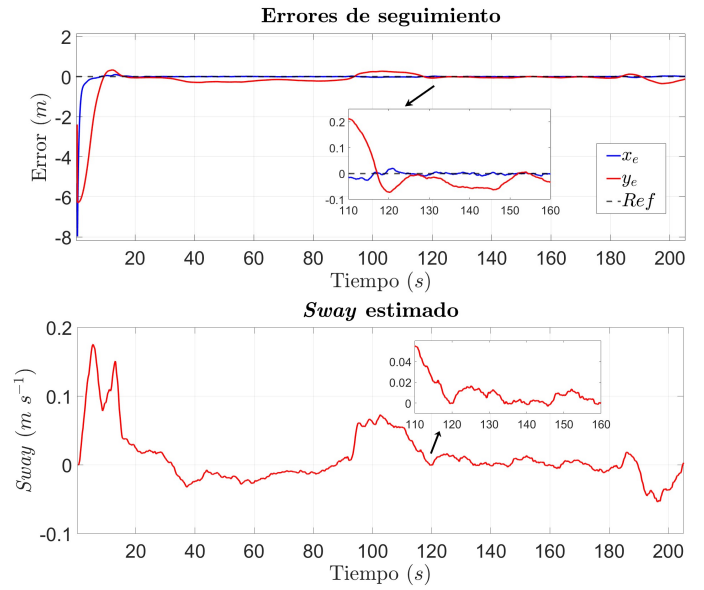


Figura 8: Errores de seguimiento y sway estimado

De la misma forma, la Figura 9 muestra el rendimiento del control de velocidad de Ardupilot, donde se alcanzan tanto las referencias de velocidad lineal como angular, asegurando el correcto funcionamiento del controlador de seguimiento de camino. Esto es consistente con el hecho de que la velocidad de referencia durante los intervalos cuando ambos errores tienden a cero es igual a u_{dmin} . También se destaca el uso de las mediciones de velocidad angular r de la IMU como segundo indicador en el control de velocidad angular, las cuales fueron obtenidas en tiempo real mediante MAVROS, y aunque no fueron integradas en el control, cumplieron un papel importante en el análisis de datos y la validación del observador de estados.

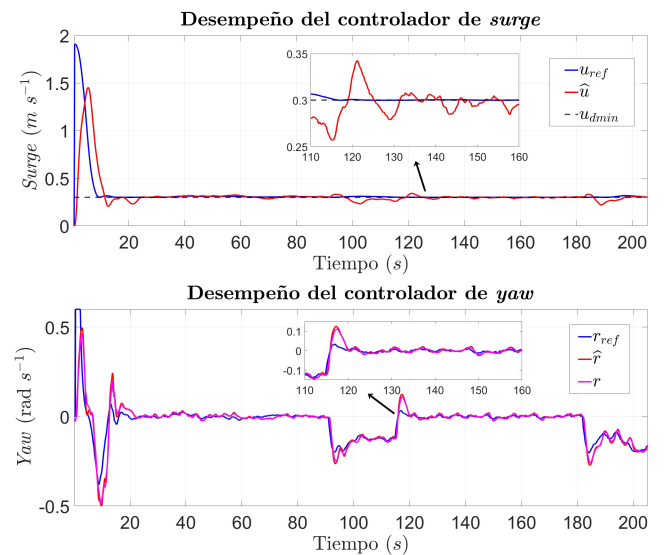


Figura 9: Control de bajo nivel de velocidad

Dado que la salida del control de seguimiento es la orientación de referencia y se implementó un filtro derivativo para obtener la velocidad angular de referencia, es importante destacar que el buen desempeño del controlador PID se refleja en el seguimiento de la orientación, como se muestra en la Figura

10. Aunque se evidencia un leve retardo del controlador, especialmente en las curvas, se demuestra su habilidad y robustez.

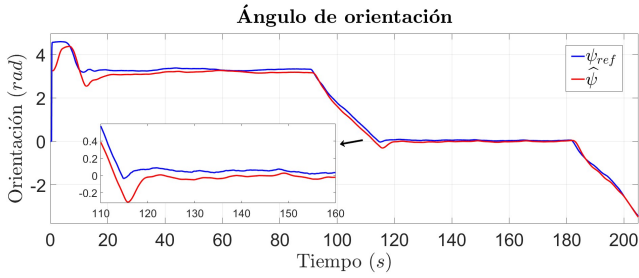


Figura 10: Rendimiento del control en la orientación

Otro indicador evaluado han sido las señales de PWM normalizadas asignadas por el control de bajo nivel, las cuales se muestran en la Figura 11. En esta gráfica se observa que al iniciar el ejercicio se evidencia una saturación en uno de los propulsores, causada evidentemente por la velocidad inicial del vehículo, el cual en todos los ejercicios parte del reposo. Sin embargo, posteriormente a esto y al alcanzar la referencia, los valores se mantienen en un intervalo entre -0.4 y 0.4, con un valor medio en los segmentos rectos de 0.15. Esto evidencia la capacidad del barco para alcanzar mayores velocidades o la posibilidad de cargar otros dispositivos, tales como herramientas de limpieza o sensores.

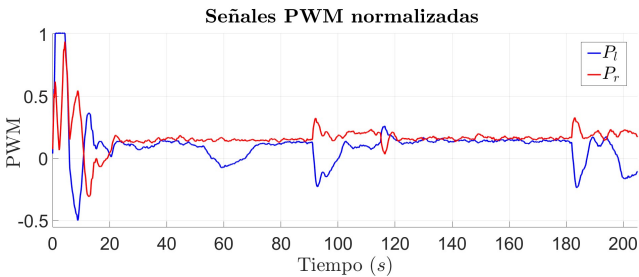


Figura 11: Rendimiento del control de velocidad

De la misma forma, al observar el comportamiento de las señales PWM en los semicírculos, se evidencia que, dada la baja velocidad de referencia y el incremento en la velocidad angular, el controlador hace que uno de los motores continúe girando en la misma dirección con un leve incremento, mientras que el otro pasa a trabajar en dirección contraria. Esto permite que la velocidad angular incremente con mayor rapidez, pero al mismo tiempo se refleja en el incremento de la velocidad lateral (*sway*) debido a la dinámica del barco. Esto también se evidencia en las perturbaciones generalizadas estimadas mostradas en la Figura 12, más específicamente en las perturbaciones que afectan a las velocidades lateral y angular al finalizar la curva.

Aunque el observador implementado en este trabajo estimó las perturbaciones generalizadas en los tres grados de libertad, estas solo fueron utilizadas como herramientas para analizar el desempeño y evaluar el comportamiento de los controladores. Sin embargo, se espera que, basado en este análisis, estas puedan ser integradas en el sistema de control y ser utilizadas como retroalimentación para controladores más robustos, con el fin de considerar las incertidumbres del modelo y las perturbaciones externas.

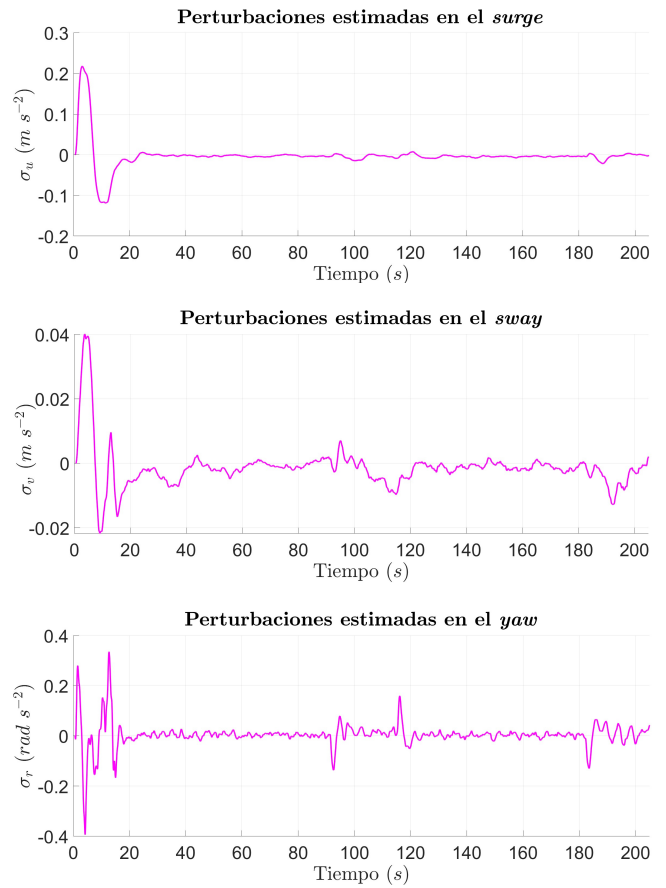


Figura 12: Perturbaciones generalizadas estimadas

Finalmente, se diseñó un tercer circuito, compuesto por ocho segmentos: cuatro líneas rectas de 25 metros y cuatro arcos circulares de 90 grados de 6 metros de radio. La Figura 13 muestra la trayectoria y los resultados de seguimiento. Para este ejercicio, se mantuvieron los mismos valores de parámetros que en los ensayos anteriores, y se realizó una sola vuelta con $u_{dmin} = 0.5$ m/s.

A diferencia de los ejercicios anteriores, este se centró en evaluar el error transversal en cada uno de los 8 segmentos que componen el circuito, con el fin de entender su respuesta a diferentes tipos de trayectorias y su capacidad para cambiar entre ellas. La Tabla 6 muestra las métricas estadísticas para cada uno de los segmentos con un umbral de 0.1 m para el PTU y los tiempos de recorrido, los cuales fueron validados mediante el valor de la variable parametrizada s al alcanzar el punto final de cada segmento.

Tabla 6: Métricas estadísticas para diferentes segmentos T_i

T_i	Tiempo (s)	Media y_e (m)	MAD y_e (m)	MSE y_e (m ²)	PTU (%)
T_1	32.60	-0.2306	0.2306	0.0545	0.00
T_2	16.80	-0.2435	0.2435	0.0641	0.00
T_3	34.80	-0.2605	0.2605	0.0684	0.00
T_4	17.60	-0.0854	0.1315	0.0227	38.79
T_5	35.70	-0.0660	0.0660	0.0057	81.49
T_6	18.10	-0.0290	0.0560	0.0047	79.80
T_7	35.50	-0.0881	0.0882	0.0102	70.85
T_8	17.20	-0.1323	0.1435	0.0320	43.42

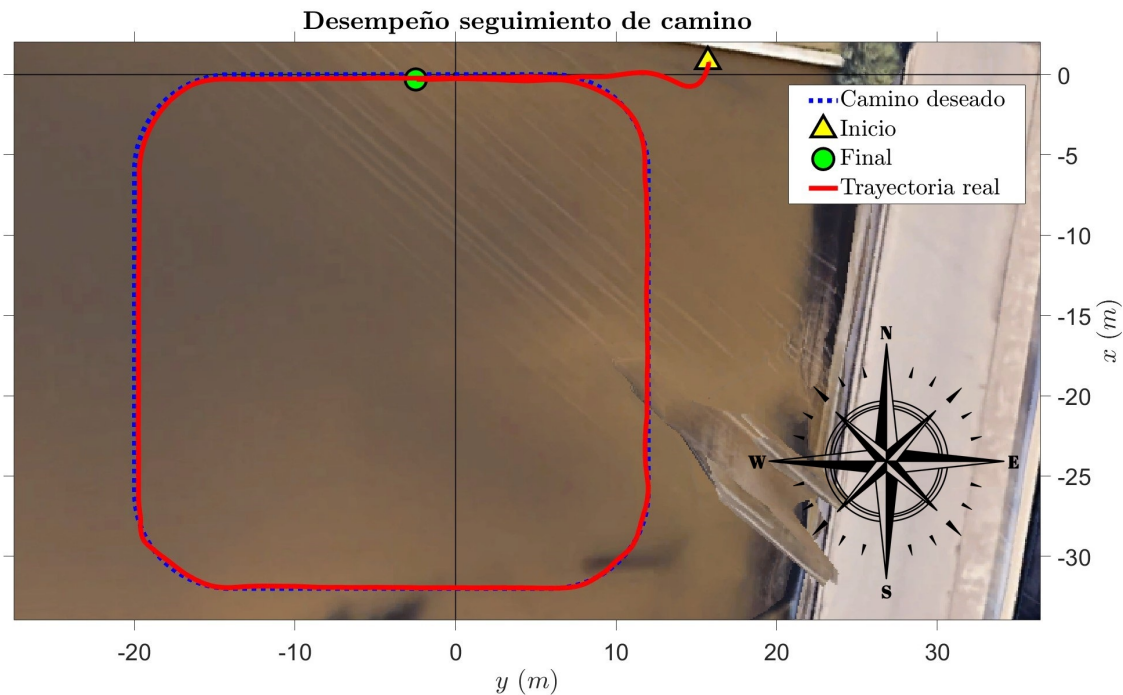


Figura 13: Circuito cerrado con arcos circulares de 6 metros de radio

Aunque el controlador puede seguir el camino en algunas ocasiones, cuando su ángulo al ingresar en los segmentos es desfavorable, puede generar un error en estado estacionario que no puede corregir. Sin embargo, en general, es capaz de seguir exitosamente la trayectoria dentro de umbrales de error aceptables.

6. Conclusiones y trabajos futuros

En conclusión, la validación experimental proporciona una evaluación del rendimiento de la estrategia de control propuesta bajo condiciones reales con perturbaciones no controladas. En primer lugar, se verifica que el parámetro Δ juega un papel crucial en la precisión del seguimiento de camino, afectando directamente a su comportamiento. Valores muy bajos pueden aumentar el error promedio a lo largo del camino, mientras que valores altos pueden reducir el tiempo de respuesta, lo cual puede ser problemático en ciertos contextos operativos. Además, variar la velocidad mínima de referencia, u_{dmin} , mostró la importancia de su influencia en la dinámica del ASV, especialmente en curvas, donde se requiere un u_{dmin} más bajo para contrarrestar los efectos del incremento de velocidad lateral y asegurar un seguimiento preciso de la trayectoria.

A pesar de los desafíos encontrados en algunos casos, como ángulos de entrada subóptimos en las trayectorias, el controlador demostró buena estabilidad y robustez general, manteniendo los errores de seguimiento de trayectoria dentro de rangos aceptables en la mayoría de los ensayos realizados. En resumen, los resultados respaldan la efectividad de la estrategia de control propuesta para el seguimiento preciso de trayectorias bajo condiciones reales, al tiempo que destacan áreas potenciales para futuras mejoras, como el uso de perturbaciones estimadas para responder a sus cambios, y la implementación de un controlador de nivel bajo más robusto que considere las dinámicas del ASV y responda a las incertidumbres del modelado.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) a través del Proyecto AQUATRONIC bajo la subvención PID2021-126921OA-C22, y a través del Proyecto ECOPORT bajo la subvención TED2021-131326A-C22. También agradecemos a la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía su colaboración y apoyo en la ejecución de pruebas en el Parque del Alamillo.

Referencias

- ArduPilot-Dev-Team, 2024. Guía del usuario de ardupilot. © Copyright 2024, ArduPilot Dev Team.
URL: <https://ardupilot.org>
- Bejarano, G., Sufiyani, N.-Y., 2020. Velocity estimation and robust non-linear path following control of autonomous surface vehicles. IFAC-PapersOnLine 53 (2), 14674–14679.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1479
- Bejarano, G., Sufiyani, N.-Y., Orihuela, L., 2022. Velocity and disturbance robust nonlinear estimator for autonomous surface vehicles equipped with position sensors. IEEE Transactions on Control Systems Technology 30 (5), 2235–2242.
DOI: 10.1109/TCST.2021.3136334
- Bibuli, M., Bruzzone, G., Caccia, M., Lapiere, L., 2009. Path-following algorithms and experiments for an unmanned surface vehicle. Journal of Field Robotics 26 (8), 669–688.
DOI: 10.1002/rob.20303
- Bonache Seco, J., Dormido Canto, J., Montalvo Martinez, M., López-Orozco, J., Besada Portas, E., De la Cruz Garcia, J., Dec. 2017. Centro de control de tierra para colaboración de vehículos autónomos marinos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 15 (1), 1.
DOI: 10.4995/riai.2017.8737
- Borhaug, E., Pavlov, A., Pettersen, K. Y., 2008. Integral los control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents. 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control, 4984–4991.
DOI: 10.1109/CDC.2008.4739352
- Breivik, M., Fossen, T., 2005. Guidance-based path following for autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE. IEEE.
DOI: 10.1109/oceans.2005.1640200

- Cerrada Collado, C., Chaos García, D., Moreno-Salinas, D., Aranda Almansa, J., Apr. 2023. Ley de control óptima de un auv funcionando con un único motor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 20 (4), 389–400.
DOI: 10.4995/riai.2023.19034
- Chen, M., Chen, S., Wu, Q., Nov. 2016. Sliding mode disturbance observer-based adaptive control for uncertain mimo nonlinear systems with dead-zone. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 31 (7), 1003–1018.
DOI: 10.1002/acs.2744
- Deng, Y., Zhang, X., Zhang, G., Oct. 2020. Line-of-sight-based guidance and adaptive neural path-following control for sailboats. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 45 (4), 1177–1189.
DOI: 10.1109/joe.2019.2923502
- Fossen, T. I., 2011. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons.
- Fossen, T. I., Pettersen, K. Y., Galeazzi, R., 2014. Line-of-sight path following for dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 23 (2), 820–827.
DOI: 10.1109/TCST.2014.2338354
- Gantiva, M., Millán Gata, P., Bejarano Pellicer, G., 2024. Implementation and evaluation of state observers and motion controllers in autonomous surface vehicle. In: 11th International Workshop on Marine Technology (MARTECH 2024), No. 23. Instrumentation viewpoint, pp. 16–17.
URL: <http://hdl.handle.net/2117/411432>
- Gu, N., Wang, D., Peng, Z., Wang, J., Han, Q.-L., 2022. Advances in line-of-sight guidance for path following of autonomous marine vehicles: An overview. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 53 (1), 12–28.
DOI: 10.1109/TSMC.2022.3162862
- Lekkas, A. M., Fossen, T. I., 2014. Integral los path following for curved paths based on a monotone cubic hermite spline parametrization. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 22 (6), 2287–2301.
DOI: 10.1109/TCST.2014.2306774
- Liu, L., Wang, D., Peng, Z., Apr. 2017. Eso-based line-of-sight guidance law for path following of underactuated marine surface vehicles with exact sideslip compensation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 42 (2), 477–487.
DOI: 10.1109/joe.2016.2569218
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., Woodall, W., 2022. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics* 7 (66).
DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074
- Miao, J., Wang, S., Tomovic, M. M., Zhao, Z., Jun. 2017. Compound line-of-sight nonlinear path following control of underactuated marine vehicles exposed to wind, waves, and ocean currents. *Nonlinear Dynamics* 89 (4), 2441–2459.
DOI: 10.1007/s11071-017-3596-9
- Morel, T. A., Bejarano, G., Manzano, J. M., Orihuela, L., 2022a. Experimental validation of robust non-linear state observers for autonomous surface vehicles equipped with position sensors. In: 2022 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). IEEE, pp. 357–362.
DOI: 10.1109/CCTA49430.2022.9966024
- Morel, T. A., Manzano, J. M., Bejarano, G., Orihuela Espina, D. L., et al., 2022b. Modelling and identification of an autonomous surface vehicle: Technical report.
URL: <http://hdl.handle.net/20.500.12412/3270>
- Morel, T. A., Orihuela Espina, L., Bejarano Pellicer, G., 2023. Modelling and identification of an autonomous surface vehicle. In: 10th International Workshop on Marine Technology (MARTECH 2023), No. 22. Instrumentation viewpoint, pp. 32–33.
URL: <http://hdl.handle.net/2117/392009>
- Peng, Z., Wang, J., Wang, D., Han, Q.-L., 2020. An overview of recent advances in coordinated control of multiple autonomous surface vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17 (2), 732–745.
DOI: 10.1109/TII.2020.3004343
- Skjetne, R., Fossen, T. I., Kokotović, P. V., Feb. 2005. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory. *Automatica* 41 (2), 289–298.
DOI: 10.1016/j.automatica.2004.10.006
- Vacca Sisterna, C., Serrano, E., Scaglia, G., Rossomando, F., Dec. 2021. Control mixto para el seguimiento de trayectoria en buques marinos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 19 (1), 27–36.
DOI: 10.4995/riai.2021.15027
- Wang, N., Sun, Z., Yin, J., Zou, Z., Su, S.-F., 2019. Fuzzy unknown observer-based robust adaptive path following control of underactuated surface vehicles subject to multiple unknowns. *Ocean Engineering* 176, 57–64.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.017
- Yu, C., Liu, C., Lian, L., Xiang, X., Zeng, Z., Sep. 2019. Elos-based path following control for underactuated surface vehicles with actuator dynamics. *Ocean Engineering* 187, 106139.
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106139
- Zereik, E., Bibuli, M., Mišković, N., Rídao, P., Pascoal, A., 2018. Challenges and future trends in marine robotics. *Annual Reviews in Control* 46, 350–368.
DOI: 10.1016/j.arcontrol.2018.10.002