

## Propuesta de control coordinado para vehículos autónomos de superficie para la monitorización de recursos hídricos

Gantiva Osorio, Manuel.<sup>a,\*</sup>, Bejarano, Guillermo<sup>a</sup>, Millán Gata, Pablo<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería, Universidad Loyola Andalucía, Avda. de las Universidades, n° 2, 41704, Sevilla, España

**To cite this article:** Gantiva, M., Bejarano, G., Millán, P. 2025. Proposal for Coordinated Control of Autonomous Surface Vehicles for Water Resource Monitoring. Actas del I Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Sevilla, España.

### Resumen

Este artículo resume los principales avances y trabajos en desarrollo de una tesis doctoral dedicada al diseño y evaluación de algoritmos de control distribuido y coordinado para vehículos autónomos de superficie. El contenido incluye una revisión sistemática del estado del arte, una descripción detallada de la plataforma experimental Yellowfish, utilizada para programar y validar los algoritmos, y la primera aproximación experimental, que validó una ley de guiado basada en Línea de Visión, combinada con un observador de estado no lineal y un controlador PID. Entre las mejoras propuestas se encuentra la implementación de un observador extendido con restricciones por conjuntos y una ley de control basada en backstepping, diseñada para incrementar la robustez del sistema frente a perturbaciones e incertidumbres. Asimismo, se desarrolla un controlador predictivo de alto nivel para coordinar múltiples vehículos en tareas colaborativas, como la navegación paralela. Este artículo subraya los avances alcanzados, identifica brechas en el estado actual del conocimiento y propone soluciones para mejorar el control y la eficiencia operativa de flotas autónomas.

*Palabras clave:* Vehículo de superficie, Control coordinado, Estimación de estados, Validación experimental, Navegación autónoma.

### Paper Title in English, Bold Style

### Abstract

This article summarizes the key advancements and ongoing work of a doctoral thesis focused on the design and evaluation of distributed and coordinated control algorithms for autonomous surface vehicles. The content includes a systematic review of the state of the art, a detailed description of the experimental platform Yellowfish—used for programming and validating the algorithms—and the first experimental approach, which validated a line-of-sight-based guidance law, combined with a nonlinear state observer and a PID controller. Proposed improvements include the implementation of an extended observer with set-based constraints and a backstepping-based control law designed to enhance the system's robustness against disturbances and uncertainties. Additionally, a high-level predictive controller is developed to coordinate multiple vehicles in collaborative tasks such as parallel navigation. This article highlights the progress achieved, identifies gaps in the current state of knowledge, and proposes solutions to improve the control and operational efficiency of autonomous fleets.

*Keywords:* Surface Vehicle, Coordinated Control, State Estimation, Experimental Validation, Autonomous Navigation

## 1. Introducción

El agua desempeña un papel crucial tanto para los seres humanos como para los ecosistemas del planeta. Sin embargo, los

recursos hídricos enfrentan amenazas provenientes de factores naturales y actividades humanas (Westall and Brack, 2018). Entre las causas humanas destacan la eutrofización acelerada debi-

do al uso excesivo de fertilizantes agrícolas, los vertidos industriales y la acidificación provocada por emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. Un ejemplo alarmante de este deterioro es la laguna del Mar Menor, en España, donde se han registrado consecuencias devastadoras para la fauna local —más de 4,5 toneladas de peces muertos—, además de un impacto negativo en la economía de la región (Cedex et al., 2017). Asimismo, con el agravamiento de los efectos del cambio climático, se hace imprescindible proteger y monitorear los recursos hídricos para garantizar un suministro continuo de agua de alta calidad.

Para enfrentar estos desafíos, resulta fundamental implementar sistemas de monitoreo en instalaciones en entornos acuáticos, como puertos, plantas de energía y zonas de acuicultura. Estas soluciones no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también contribuyen a prevenir daños ambientales (Bai et al., 2022).

En este contexto, el Libro Verde sobre la Gobernanza del Agua en España destaca la necesidad de avanzar hacia la digitalización de la gestión del agua. Señala que el sector aún no ha adoptado plenamente las tecnologías de información y comunicación (TIC), herramientas esenciales para que la información relevante esté disponible para los responsables de la toma de decisiones y accesible al público. Entre los objetivos prioritarios se encuentran: i) la generación de datos en tiempo real y con suficiente resolución; ii) la mejora en la disponibilidad de los datos; y iii) la apertura de estos al público para una gestión más transparente y eficiente.

El uso de Vehículos de Superficie Autónomos (ASVs, por sus siglas en inglés) ha crecido notablemente en áreas como exploración marina, monitoreo ambiental, seguridad marítima y operaciones *offshore* (Liu et al., 2016). Estas plataformas no tripuladas tienen el potencial de transformar tareas que antes requerían embarcaciones tripuladas, aumentando la eficiencia, reduciendo costos operativos y mejorando la seguridad en entornos marítimos exigentes. Mientras las capacidades individuales de los ASVs han avanzado, el interés ahora se centra en estrategias de control coordinado para maximizar su potencial colectivo (Peng et al., 2021). La gestión conjunta de múltiples ASVs presenta retos específicos, como la necesidad de algoritmos avanzados que permitan una coordinación efectiva, comunicación en tiempo real y adaptabilidad a las condiciones ambientales y necesidades de misión.

El grupo de investigación Optimización y Control de Sistemas Distribuidos<sup>1</sup>, en su línea de drones acuáticos, ha diseñado y adquirido tres ASVs tipo catamarán, denominados Yellowfish, equipados con sensores como GPS, unidad de medición inercial (IMU) y cámaras, además de incluir dos computadoras de placa única para el procesamiento de datos. Estos vehículos están diseñados para tareas como el monitoreo de variables ambientales y la limpieza de puertos. No obstante, el desarrollo de algoritmos de control aún enfrenta desafíos importantes, como el diseño de una arquitectura que permita programarlos y configurarlos de manera efectiva.

La integración de estos algoritmos en el sistema operativo robótico ROS 2 representa una solución prometedora. Gracias a su arquitectura modular y altamente escalable, ROS2 facilita

el desarrollo, prueba e implementación de soluciones robóticas complejas (Macenski et al., 2022). Además, permite la comunicación eficiente entre múltiples nodos y mejora la interoperabilidad entre componentes, consolidándose como una plataforma de referencia en la robótica moderna.

El grupo ha realizado contribuciones significativas en el control de ASVs, incluyendo propuestas de observadores de estados para estimar velocidades y perturbaciones a partir de mediciones de posición y orientación por Bejarano and N-Yo (2020) y Orihuela et al. (2022), así como controladores de velocidad (Bejarano et al., 2022b) y técnicas de seguimiento de caminos (Bejarano et al., 2022a). Sin embargo, uno de los mayores retos sigue siendo la validación experimental de estos algoritmos, dado que muchos de ellos se han probado principalmente en simulaciones.

Este trabajo busca no solo superar estos desafíos, sino también contribuir al avance del conocimiento en el uso coordinado de ASVs, promoviendo la innovación en la gestión de recursos hídricos y la protección ambiental.

## 2. Metodología

El objetivo de esta tesis doctoral es desarrollar e implementar algoritmos de control distribuido y coordinado específicamente diseñados para supervisar y dirigir una flota de vehículos de superficie autónomos.

Estos algoritmos buscan optimizar la coordinación y mejorar la eficiencia en las operaciones de la flota, garantizando un control preciso y seguro en diversas situaciones y entornos marinos, como lagos y puertos (Luo et al., 2024). Para alcanzar este propósito, se proponen cinco fases de desarrollo:

**Revisión bibliográfica:** Como punto de partida, se realizará una revisión sistemática de la literatura para identificar y analizar investigaciones previas sobre algoritmos de control distribuido y coordinado aplicados a ASVs. Este análisis permitirá sintetizar los hallazgos y establecer una base teórica sólida, además de comprender el estado actual del conocimiento en este campo. Asimismo, se espera identificar artículos con enfoques y diseños adecuados para su implementación y validación experimental.

**Desarrollo y ajuste de las plataformas ASV:** Para validar los algoritmos que se desarrollen o implementen, se empleará la flota de tres ASVs tipo catamarán perteneciente al grupo de investigación Optimización y Control de Sistemas Distribuidos. Se propone utilizar el sistema operativo robótico ROS2, el cual ofrecerá una arquitectura de control flexible y versátil que facilita la integración de algoritmos de control y estimación.

**Control de movimiento y observadores de estado:** Estos algoritmos proporcionan a las capas de control de mayor nivel información confiable y versátil en tiempo real. Uno de los retos en la validación experimental es la estimación de velocidades y perturbaciones; por ello, se plantea la implementación y evaluación de observadores de estado capaces de estimar dichas variables. Además, se desarrollan algoritmos de fusión de datos para mejorar el rendimiento utilizando información de sensores como IMUs. Los algoritmos de control, por su parte, buscan

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

seguir referencias de velocidad minimizando el impacto de perturbaciones e incertidumbres en el modelo.

Control de formación y comportamiento de enjambre: A partir de los resultados de la primera fase y los desarrollos previos del grupo de investigación, se identifican algoritmos candidatos de formación o comportamiento de enjambre para su implementación e integración. Se incluyen consideraciones como la evasión de obstáculos fijos, incertidumbres en el modelado, conectividad y preservación de la formación. Además, se dedica especial atención a enfoques que integren técnicas de aprendizaje automático para mejorar la autonomía y el comportamiento de la flota.

Evaluación y comparación de algoritmos de control: Finalmente, se realizan pruebas en lagos o puertos para validar el comportamiento y el rendimiento de los algoritmos de control implementados. Estas pruebas permiten analizar las ventajas y desventajas de cada enfoque, así como identificar posibles mejoras para futuros trabajos o aplicaciones en actividades como el monitoreo y la limpieza de fuentes de agua.

El desarrollo de esta tesis busca contribuir significativamente al avance del conocimiento en la gestión coordinada de flotas de ASVs, con aplicaciones potenciales en la protección del medio ambiente y la optimización de operaciones en entornos acuáticos.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección 3 expone los principales resultados de la revisión bibliográfica, incluyendo las características más relevantes de los ASVs, su software, y algunos objetivos de control estrechamente relacionados con los proyectos que enmarcan este trabajo. Posteriormente, la Sección 4 presenta el ASV Yellowfish, acompañado de una descripción detallada del hardware y software empleados. En la Sección 5, se describe brevemente la primera estrategia de control validada experimentalmente, junto con algunos de los resultados más destacados. Finalmente, la Sección 6 incluye los trabajos en curso, subrayando los avances principales y las propuestas futuras.

### 3. Revisión bibliográfica

En esta etapa de la investigación, se adoptó un enfoque sistemático para garantizar rigor, transparencia y exhaustividad en el análisis. Este método minimiza sesgos al seguir un protocolo predefinido con criterios claros de inclusión y exclusión, permitiendo una revisión imparcial y representativa de la bibliografía disponible (Brereton et al., 2007). Asimismo, su estructura organizada facilita la identificación de brechas en la investigación, resalta tendencias clave y permite sintetizar los hallazgos de manera clara, apoyándose en herramientas como tablas comparativas (Ierardi et al., 2019). Este enfoque resulta particularmente valioso en áreas complejas y multidisciplinarias, como el control de ASVs, donde la integración de conocimientos es fundamental para avanzar en el estado del arte.

Como resultado de este proceso, Gantiva Osorio et al. (2024b) presenta una revisión sistemática de los avances y desafíos en el control coordinado de múltiples vehículos autónomos de superficie. Este análisis destaca aplicaciones en áreas como la exploración marina, el monitoreo ambiental, la seguridad marítima y las operaciones *offshore*. Además, subraya la

necesidad de enfoques interdisciplinarios que combinen robótica, teoría de control, sistemas de comunicación y ciencias marinas para abordar las complejidades inherentes a la operación de flotas de ASVs.

Uno de los aspectos centrales del estudio fue el análisis de los objetivos de control en la coordinación de múltiples ASVs. Entre estos objetivos se incluyen el seguimiento de trayectorias, la estabilización de formaciones, la preservación de la conectividad en redes de comunicación y la evitación de colisiones entre agentes. Estas metas pueden lograrse mediante diversas técnicas de control, como los métodos basados en la teoría de Lyapunov, el control adaptativo, el control predictivo y los enfoques basados en observadores de estado. Además, se destaca el creciente uso de técnicas de aprendizaje profundo y redes neuronales, las cuales están siendo implementadas cada vez con mayor frecuencia para mejorar la autonomía y la capacidad de respuesta de los ASVs frente a condiciones de incertidumbre en el modelo.

En relación con los principales desafíos del control coordinado, se identificaron problemáticas como las matrices de inercia no diagonales, que dificultan el diseño de sistemas de control debido al acoplamiento dinámico; las perturbaciones externas, tales como viento, olas y corrientes, que afectan la estabilidad y precisión del movimiento de los ASVs; y las limitaciones físicas de los actuadores, cuya configuración debe gestionarse cuidadosamente para evitar comportamientos indeseados en los sistemas de control. También se abordaron los problemas asociados con estados no medidos, para los cuales se emplean observadores de estado o técnicas de aprendizaje destinadas a estimar variables críticas como velocidades, posiciones o parámetros desconocidos específicos de los vehículos.

Para concluir, se destaca la importancia de integrar métodos híbridos que aprovechen las fortalezas de distintos enfoques, como la combinación de técnicas predictivas con elementos adaptativos o el uso de controladores basados en funciones de Lyapunov. Asimismo, se identifican brechas significativas en la investigación actual, tales como la limitada validación experimental en escenarios realistas y la escasa exploración de configuraciones descentralizadas en entornos con restricciones de comunicación. Estas observaciones proporcionan una orientación valiosa para las decisiones futuras de este trabajo, subrayando la necesidad de desarrollar estrategias más robustas y adaptativas que permitan maximizar el potencial de aplicaciones marítimas complejas.

### 4. Plataforma experimental ASV

El vehículo autónomo de superficie utilizado para la programación y validación de los algoritmos es el ASV Yellowfish, un catamarán desarrollado por el grupo de investigación en Optimización y Control de Sistemas Distribuidos de la Universidad Loyola Andalucía (Morel et al., 2022). Este vehículo es un sistema subactuado, ya que dispone de únicamente dos propulsores BlueRobotics T200 para controlar tres grados de libertad, lo que representa un desafío en el diseño e implementación de estrategias de control.

En términos de hardware, el Yellowfish ASV está equipado con dos ordenadores compactos. El primero es una Raspberry



Figura 1: El ASV Yellowfish y su hardware

Pi 4, que integra el módulo Navio2 junto con el software ArduPilot, permitiendo la gestión de sensores y actuadores básicos. Sin embargo, las capacidades limitadas de este sistema dificultan la ejecución de controladores avanzados, como los necesarios para el seguimiento de trayectorias y la coordinación de flotas. Por esta razón, se añadió un segundo ordenador, una Jetson Xavier Nx de NVIDIA, que cuenta con una GPU CUDA de alto rendimiento, ideal para tareas que demandan un procesamiento intensivo, como algoritmos de inteligencia artificial. Además, esta plataforma admite la conexión a cámaras y sensores de alta resolución, incrementando su versatilidad y capacidad para implementar controladores de nivel superior.

Entre los componentes adicionales, destaca un módulo GPS con base RTK que proporciona precisión centimétrica, un módulo Xbee para la comunicación entre agentes, un módem Wi-Fi para conexión a internet, y un control remoto de largo alcance con su respectivo receptor. En cuanto al sistema de alimentación, el ASV utiliza una batería de 22.2 V y 20,000 mAh, acompañada de dos reguladores de voltaje: uno dedicado a la alimentación de los ordenadores y otro para los propulsores. Este diseño garantiza una operación eficiente y fiable en diversas condiciones operativas.

El software seleccionado para este proyecto fue ROS 2 Humble, un marco de trabajo de código abierto diseñado específicamente para el desarrollo de aplicaciones robóticas. ROS 2 destaca por su escalabilidad, soporte para sistemas distribuidos y características de seguridad (Rico, 2022). Proporciona herramientas, bibliotecas y convenciones que simplifican las tareas de desarrollo, control y monitoreo de robots. Aunque técnicamente no es un sistema operativo, ROS 2 incluye un núcleo de funcionalidades, una arquitectura modular basada en plugins, una suite de herramientas especializadas y una comunidad en línea activa. En proyectos robóticos, su modularidad y los paquetes especializados, facilitan la gestión de transformaciones espaciales, el manejo de datos básicos y la ejecución de tareas de navegación de manera eficiente.

Para abordar problemas de compatibilidad entre ROS 2 Humble, que requiere Ubuntu 22.04, y el sistema JetPack 5.1 de la Jetson Xavier NX, basado en Ubuntu 20.04, se implementaron contenedores Docker. Docker permite ejecutar ROS

2 Humble en un entorno aislado, ofreciendo ventajas como portabilidad, aislamiento y escalabilidad en sistemas distribuidos, además de reducir significativamente los tiempos de desarrollo (Mouat, 2016). Al empaquetar todas las dependencias en contenedores ligeros, Docker garantiza una ejecución consistente y facilita la implementación en entornos heterogéneos, convirtiéndose en una solución ideal para aplicaciones robóticas.

En este proyecto, se configuró un contenedor Docker en la Jetson Xavier NX que incluye ROS 2 Humble, MAVROS y Python, permitiendo la comunicación por Ethernet con una Raspberry Pi. Esta configuración soporta el registro de datos en archivos ROSBAG para análisis experimental y habilita la integración de herramientas adicionales, como el módulo Xbee para comunicación entre agentes. Este enfoque no solo resuelve las limitaciones impuestas por las versiones del sistema operativo, sino que también mejora la flexibilidad y portabilidad del entorno de desarrollo, proporcionando una infraestructura robusta y eficiente para el proyecto.

## 5. Estrategia para seguimiento de caminos

La primera aproximación experimental consistió en la implementación y validación de una ley de guiado basada en la técnica de Línea de Visión (Line-of-Sight, LOS) para un ASV (Gantiva Osorio et al., 2024a). Esta estrategia combina un observador de estado no lineal con un controlador PID para la regulación de velocidad, teniendo como objetivo principal garantizar un seguimiento preciso de trayectorias parametrizadas en condiciones reales y bajo la influencia de perturbaciones externas.

La metodología empleada utiliza una ley de guiado LOS propuesta por Wang et al. (2019) para permitir que el vehículo converja hacia el camino deseado, minimizando los errores transversales y longitudinales. Entre los parámetros ajustables destacan, distancia de anticipación y velocidad mínima deseada sobre el camino, los cuales son optimizados para mejorar el rendimiento en diferentes escenarios operativos. Por su parte, el controlador PID de bajo nivel se encarga de regular las velocidades angular y de avance del ASV. Este controlador se configuró experimentalmente ajustando las ganancias proporcional,

integral y derivativa para satisfacer las necesidades específicas del vehículo. Adicionalmente, el observador de estado no lineal propuesto por Bejarano and N-Yo (2020) fue incluido para estimar perturbaciones generalizadas y estados no medibles, como velocidades y efectos externos, lo que reduce la dependencia de sensores adicionales y aumenta la robustez del sistema frente a incertidumbres y perturbaciones.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Lago de los Patos, situado en el Parque del Alamillo, Sevilla. Durante estas evaluaciones, se consideraron condiciones reales, incluyendo perturbaciones como viento y corrientes. Los experimentos se realizaron en circuitos cerrados que abarcaron trayectorias rectas y curvadas con radios variables como el mostrado en la Figura 2. En cada recorrido, se modificaron diferentes parámetros de control para analizar su impacto en el desempeño de la estrategia. Para evaluar los resultados, se utilizaron diversas métricas estadísticas, tales como el error cuadrático medio (MSE), la desviación media absoluta (MAD) y el porcentaje de tiempo dentro del umbral (PTU), proporcionando un análisis detallado de la efectividad del sistema en escenarios realistas.

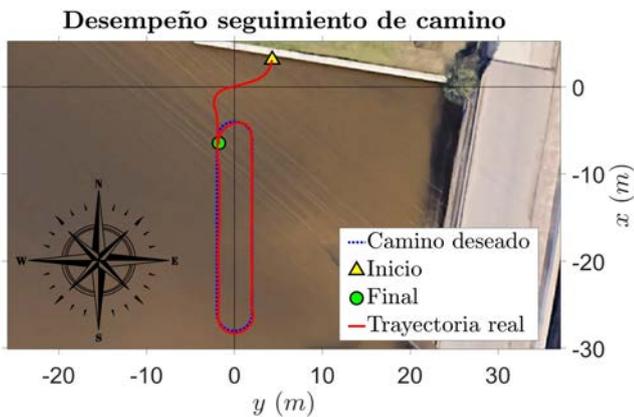


Figura 2: Desempeño en el seguimiento de camino

Las conclusiones principales de esta validación indican que la estrategia de control basada en el guiado LOS es efectiva para el seguimiento de circuitos bajo condiciones reales. No obstante, el desempeño del controlador está influenciado por parámetros ajustables como la distancia de anticipación y la velocidad mínima deseada, así como por las dinámicas del ASV durante transiciones críticas. Para optimizar aún más el sistema, se sugieren las siguientes mejoras: integrar las perturbaciones estimadas directamente en la ley de control, diseñar controladores de bajo nivel más robustos que consideren las dinámicas completas del ASV y analizar el impacto de velocidades de referencia variables. En términos generales, los resultados obtenidos respaldan el potencial de esta metodología para aplicaciones en entornos marítimos, ofreciendo perspectivas prometedoras para futuras investigaciones y su implementación práctica en escenarios reales.

## 6. Trabajos en curso

A partir de la experiencia obtenida en la primera validación experimental, se han identificado varias rutas de mejora. Una de las principales es la implementación de un observador lineal

más robusto, capaz de integrar no solo las mediciones de posición y orientación, sino también los datos proporcionados por la IMU. Este observador debería considerar explícitamente la presencia de ruido en todas las mediciones, lo que incrementaría significativamente la calidad y precisión de las estimaciones.

Por otro lado, aunque el control de velocidad PID integrado en ArduPilot ha demostrado ser útil para una primera aproximación, se hace evidente la necesidad de desarrollar un controlador más robusto. Este nuevo controlador no solo debería depender de las mediciones disponibles, sino también incorporar el modelo matemático del barco, permitiendo una representación más precisa de su dinámica. Además, debería aprovechar las perturbaciones estimadas por el observador para mejorar la compensación de efectos externos y aumentar la estabilidad y el desempeño del sistema bajo condiciones operativas reales.

Las propuestas planteadas incluyen la integración de un observador de estado extendido con restricciones por conjuntos (ESO) propuesto por Orihuela et al. (2022) y una ley de control basada en la metodología de *backstepping* propuesta por Bejarano et al. (2022a). Este enfoque permitirá que el proceso de estimación no dependa exclusivamente de mediciones de posición y orientación con ruido acotado, sino que también integre la información de un sensor adicional. Además, se definirán parámetros específicos para cuantificar el ruido asociado a las mediciones, mejorando la precisión y confiabilidad del sistema. Para implementar este observador, se realizará un ajuste teórico que adapta la estrategia de control al modelo del vehículo identificado experimentalmente (Morel et al., 2025). Esto incluirá una identificación inversa que simplifica el cálculo del control de velocidad, lo que resulta en una reducción significativa de la carga computacional sin comprometer el rendimiento del sistema. La incorporación de esta propuesta no solo aborda las brechas identificadas en la primera aproximación experimental, sino que también establece una base sólida para el desarrollo de controladores destinados a la gestión de flotas.

Finalmente, la estructura por capas implementada ha demostrado ser robusta, permitiendo una clara división de responsabilidades de control y facilitando el ajuste de cada componente. Esta organización no solo mejora la modularidad y escalabilidad del sistema, sino que también abre la posibilidad de aplicar estructuras similares en futuros controles coordinados. En estos escenarios, se podría mantener la configuración actual para cada agente de una flota, mientras se desarrollan controladores de nivel superior. Estos controladores serían responsables de generar referencias para cada agente, basándose tanto en su propia información como en la de sus vecinos, con el objetivo de preservar una estructura o formación preestablecida.

Actualmente, se encuentra en desarrollo el primero de estos controladores de alto nivel, cuyo principal objetivo es permitir que dos agentes, compartiendo sus estados estimados, puedan navegar de forma paralela mientras transportan una herramienta que los conecta físicamente. La propuesta integra la estructura previamente implementada con un controlador predictivo capaz de optimizar las velocidades de referencia a lo largo de la trayectoria, manteniendo la formación establecida. Esta estrategia busca garantizar la coordinación precisa entre los agentes, incluso en presencia de perturbaciones externas o dinámicas no modeladas. Una vez validada con éxito en un sistema de dos agentes, la propuesta será evaluada en escenarios más comple-

jos con un mayor número de vehículos, proporcionando una base para el desarrollo de flotas coordinadas en aplicaciones marítimas avanzadas. Este enfoque representa un paso significativo hacia la integración de estrategias predictivas y colaborativas en el control de vehículos autónomos de superficie.

## 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

- Bai, X., Li, B., Xu, X., Xiao, Y., Jun. 2022. A review of current research and advances in unmanned surface vehicles. *Journal of Marine Science and Application* 21 (2), 47–58.  
DOI: 10.1007/s11804-022-00276-9
- Bejarano, G., Manzano, J. M., Salvador, J. R., Limon, D., Aug. 2022a. Non-linear model predictive control-based guidance law for path following of unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering* 258, 111764.  
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111764
- Bejarano, G., N-Yo, S., 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., N-Yo, S., Orihuela, L., Sep. 2022b. 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
- Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M., Khalil, M., Apr. 2007. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software* 80 (4), 571–583.  
DOI: 10.1016/j.jss.2006.07.009
- Cedex, J., et al., 2017. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España.
- Gantiva Osorio, M., Bejarano, G., Millán Gata, P., Sep. 2024a. Validación de ley de guiado para vehículos autónomos de superficie. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*.  
DOI: 10.4995/riai.2024.21949
- Gantiva Osorio, M., Ierardi, C., Jurado Flores, I., Pereira Martín, M., Millán Gata, P., Nov. 2024b. Coordinated control of multiple autonomous surface vehicles: Challenges and advances — a systematic review. *Ocean Engineering* 312, 119160.  
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119160
- Ierardi, C., Orihuela, L., Jurado, I., Oct. 2019. Distributed estimation techniques for cyber-physical systems: A systematic review. *Sensors* 19 (21), 4720.  
DOI: 10.3390/s19214720
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., Yuan, C., 2016. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control* 41, 71–93.  
DOI: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.018
- Luo, H., Jia, S., Chen, S., Ma, L., Nov. 2024. Embodied intelligence in unmanned surface vehicles: current applications and future perspectives. In: Loskot, P., Hu, L. (Eds.), *International Conference on Algorithms, High Performance Computing, and Artificial Intelligence (AHPCAI 2024)*. SPIE, p. 56.  
DOI: 10.1117/12.3051585
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., Woodall, W., May 2022. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics* 7 (66).  
DOI: 10.1126/scirobotics.abm6074
- Morel, T., Orihuela, L., Combastel, C., Bejarano, G., Mar. 2025. Practical identification approach for the actuation dynamics of autonomous surface vehicles with minimal instrumentation. *Ocean Engineering* 319, 120098.  
DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.120098
- Morel, T. A., Manzano, J. M., Bejarano, G., Orihuela Espina, D. L., et al., 2022. Modelling and identification of an autonomous surface vehicle: Technical report.  
URL: <http://hdl.handle.net/20.500.12412/3270>
- Mouat, A., 2016. *Using docker, first edition*. Edition. O'Reilly, Beijing.
- Orihuela, L., Combastel, C., Bejarano, G., Jul. 2022. Set-membership state estimation of autonomous surface vehicles with a partially decoupled extended observer. In: *2022 European Control Conference (ECC)*. IEEE.  
DOI: 10.23919/ecc55457.2022.9838213
- Peng, Z., Wang, J., Wang, D., Han, Q.-L., Feb. 2021. 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
- Rico, F. M., Sep. 2022. *A Concise Introduction to Robot Programming with ROS2*. Chapman and Hall/CRC.  
DOI: 10.1201/9781003289623
- Wang, N., Sun, Z., Yin, J., Zou, Z., Su, S.-F., Mar. 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
- Westall, F., Brack, A., Feb. 2018. The importance of water for life. *Space Science Reviews* 214 (2).  
DOI: 10.1007/s11214-018-0476-7