

Jornadas de Automática

Limpieza de residuos flotantes en entornos acuáticos mediante vehículos autónomos

Guillermo Bejarano^{a,b,*}, Laura Pérez^a, Ana Vera^a, Manuel Gantiva-Osorio^a, Federico Peralta^{a,b}, Pablo Millán^{a,b}

^aDepartamento de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad Loyola Andalucía, Sevilla, Spain (e-mail: {gbejarano, lperezsoto, averaguerrero, megantiva, fdperalta, pmillan}@uloyola.es)

^bInstituto de Energía, Tecnología y Sostenibilidad (LETS), Universidad Loyola Andalucía, Sevilla, Spain

To cite this article: Bejarano, G., Perez, L., Vera, A., Gantiva-Osorio, M., Peralta, F., Millan, P. 2026. Surface waste removal in aquatic environments using autonomous vehicles. Jornadas de Automática, 47.
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13867>

Resumen

La presencia de residuos flotantes en medios acuáticos constituye un desafío ambiental relevante. En este contexto, los vehículos autónomos de superficie (ASVs) representan una alternativa eficaz para realizar operaciones de limpieza de manera repetible y escalable. Sin embargo, las configuraciones cooperativas con dispositivos remolcados aún presentan una validación experimental limitada. En este trabajo se presenta la validación de un sistema de limpieza basado en dos ASVs que arrastran una red para la recogida de residuos superficiales. La solución se sustenta en una arquitectura de control jerárquica que integra observadores de estado, estrategias de guiado y un controlador predictivo centralizado de alto nivel. Este coordina el movimiento de los vehículos a lo largo de trayectorias curvilíneas, manteniendo la geometría de la formación y compensando los efectos del remolque. Los resultados experimentales muestran un comportamiento cooperativo estable y robusto, lo que posiciona el sistema como un avance práctico hacia soluciones autónomas de limpieza superficial en entornos acuáticos reales.

Palabras clave: Navegación, guiado y control de sistemas marinos, Vehículos autónomos de superficie, Control coordinado, Control predictivo, Sistemas multiagente.

Surface waste removal in aquatic environments using autonomous vehicles

Abstract

The presence of floating debris in aquatic environments constitutes a significant environmental challenge. In this context, autonomous surface vehicles (ASVs) offer an effective solution for performing cleaning operations in a scalable, repeatable manner. However, cooperative configurations involving towed devices still exhibit limited experimental validation. This work presents the validation of a cleaning system comprising two ASVs towing a net to collect floating debris. The proposed solution relies on a hierarchical control architecture that integrates state observers, guidance strategies, and a centralised high-level model predictive controller. This controller coordinates the motion of the vehicles along curvilinear trajectories, preserving the formation geometry and compensating for towing effects. The experimental results show stable and robust cooperative behaviour, positioning the system as a practical step toward the deployment of autonomous surface-cleaning solutions in real aquatic environments.

Keywords: Marine system navigation, guidance and control, Autonomous surface vehicles, Coordinated control, Predictive control, Multi-agent systems.

1. Introducción

La contaminación del agua en puertos, lagos y ríos es un problema creciente, causado por vertidos de hidrocarburos, re-

síduos plásticos flotantes y otros contaminantes superficiales. Estos degradan los ecosistemas, reducen la calidad del agua y afectan a la biodiversidad y a las actividades humanas (Rajendran et al., 2024). Las estrategias tradicionales de limpie-

*Autor para correspondencia: gbejarano@uloyola.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

za dependen de operadores humanos, infraestructuras fijas o unidades aisladas, lo que limita su eficacia en escenarios que requieren rapidez y cobertura amplia. Soluciones como las barreras flotantes, útiles en contextos específicos, presentan limitaciones ante vertidos dinámicos o dispersos y requieren alta coordinación (Giron-Sierra et al., 2015).

Revisiones recientes destacan la necesidad de soluciones robóticas que combinen métodos físicos, químicos y biológicos con detección basada en inteligencia artificial y vehículos acuáticos para lograr intervenciones eficientes y escalables (Rajendran et al., 2024; Gantiva Osorio et al., 2024). En este contexto, los Vehículos de Superficie Autónomos (*Autonomous Surface Vehicles*, ASVs) son una herramienta prometedora para tareas de monitorización y actuación. Diversos estudios demuestran su viabilidad en la recuperación de vertidos, remolque de barreras, confinamiento cooperativo, recogida de residuos y monitorización de la calidad del agua (Arrichiello et al., 2012; Giron-Sierra et al., 2015; Wang et al., 2016). Sin embargo, muchas propuestas se limitan a detección o contención, emplean modelos simplificados o se validan en entornos controlados, lo que reduce su aplicabilidad práctica.

Desde el punto de vista del control, la operación autónoma en entornos marinos presenta desafíos asociados a la no linealidad, la subactuación, la incertidumbre y las perturbaciones externas. Tradicionalmente, el control de ASVs se clasifica en posicionamiento dinámico, seguimiento de trayectorias y seguimiento de camino (Breivik, 2010). En vehículos subactuados, las estrategias basadas en línea de visión (*Line-of-Sight*, LOS) son ampliamente utilizadas, mientras que enfoques recientes integran control predictivo (MPC) y observadores robustos para mejorar la precisión y la compensación de perturbaciones (Liu et al., 2019; Bejarano et al., 2022). Este trabajo se fundamenta en dichas metodologías.

La coordinación de múltiples ASVs añade complejidad debido al control de formación, evitación de colisiones, conectividad y comunicaciones. Aunque el control cooperativo aporta ventajas claras, su aplicación práctica sigue siendo un reto por la interacción entre vehículos, las limitaciones de comunicación y la escasez de validaciones experimentales (Gantiva Osorio et al., 2024). Estas dificultades se acentúan cuando los ASVs están acoplados mediante herramientas de limpieza.

En particular, la limpieza con ASVs se ha estudiado para la recogida de plásticos flotantes. Experimentos muestran que dos embarcaciones pueden remolcar una red para recolectar residuos, aunque surgen problemas como fuerzas de remolque, mantenimiento de la separación lateral e inestabilidades tipo “tira y afloja” (Giron-Sierra et al., 2005, 2015). Otros trabajos sobre confinamiento cooperativo confirman su potencial, pero evidencian la necesidad de controladores altamente coordinados (Arrichiello et al., 2012; Wang et al., 2016).

Este trabajo propone y valida experimentalmente una arquitectura de control jerárquico para dos ASVs que remolcan una red de limpieza. El nivel superior emplea un MPC centralizado para coordinar el avance a lo largo de trayectorias curvas, lo que garantiza la eficacia del dispositivo. El nivel intermedio genera referencias coherentes de guiado y el nivel inferior controla cada vehículo, compensando no linealidades e incertidumbres. La plataforma desarrollada permite la recogida efectiva de residuos plásticos flotantes y está orientada a su aplicación en entornos reales, contribuyendo al desarrollo

de sistemas autónomos escalables. Las principales contribuciones del trabajo son el diseño de la arquitectura de control jerárquico, especialmente de la capa predictiva de alto nivel, y su validación experimental en un entorno real sometido a perturbaciones ambientales y al efecto del remolque de la red de limpieza sobre el movimiento de los ASVs.

El resto del artículo se estructura de la siguiente forma. La Sección 2 describe la plataforma experimental. La Sección 3 describe el modelo del vehículo, mientras que la Sección 4 detalla la estrategia de control propuesta. La Sección 5 desarrolla la formulación del controlador de alto nivel y la Sección 6 analiza los resultados experimentales. Finalmente, la Sección 7 recoge las conclusiones y plantea líneas de trabajo futuras.

Notación

El conjunto de números enteros desde a hasta b se denota como $\mathbb{I}_a^b$. La norma ponderada de un vector $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$ con matriz de ponderación $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ se define como $\|\mathbf{v}\|_M = \mathbf{v}^T \mathbf{M} \mathbf{v}$. Los valores predichos de una señal $\omega(t)$ se denotan como $\hat{\omega}(t)$. Dada una señal en tiempo discreto $\chi(k)$, su valor j pasos de tiempo hacia adelante se expresa como $\chi(j|k)$.

2. Descripción de la plataforma experimental

Se emplean dos ASVs completamente equipados, conectados entre sí mediante una red de limpieza. A continuación, se describen los vehículos, con sus capacidades tecnológicas, sensores y *hardware*, y la red de recogida de residuos.

2.1. Vehículos autónomos de superficie

En este trabajo se utiliza el ASV *Yellowfish*, un catamarán desarrollado como plataforma de investigación para aplicaciones acuáticas orientadas a la sostenibilidad. Su configuración proporciona estabilidad lateral y espacio suficiente en cubierta para la integración de electrónica embarcada, mientras que sus dimensiones compactas facilitan su despliegue en entornos acuáticos abrigados, como lagos, ríos, embalses, puertos y zonas costeras. Dispone de dos propulsores ubicados en popa, en configuración diferencial, lo que implica que el vehículo es subactuado en el plano horizontal, al no disponer de actuación directa sobre la dirección lateral (*sway*). Una descripción detallada del diseño mecánico y de la arquitectura *hardware* puede consultarse en el trabajo de Gantiva-Osorio et al. (2026).



Figura 1: Vehículos *Yellowfish* unidos por la red de limpieza.

Cada ASV *Yellowfish* integra capacidades de percepción, comunicación y computación necesarias para la operación autónoma. La posición y la orientación se obtienen mediante un Sistema Global de Navegación por Satélite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) y sensores inerciales, mientras

que el módulo de comunicación permite la supervisión remota y la coordinación entre los vehículos. La arquitectura de cómputo combina una interfaz de control basada en Raspberry Pi —encargada de la telemetría, la integración sensorial y la gestión de actuadores— con un computador Jetson Xavier NX para la ejecución de los algoritmos de control y coordinación.

En este trabajo se emplean dos ASVs *Yellowfish* como flota cooperativa, como se muestra en la Figura 1, junto con la red de recogida de residuos, que se describe en la Sección 2.2.

2.2. Red de recogida de residuos flotantes

Los ASVs se interconectan mediante una herramienta de limpieza central que actúa como un cuerpo libre; aunque no se aplica control directo, se asume que mantendrá una posición favorable durante toda la operación. Para abordar los residuos flotantes más comunes (macroplásticos, ramas y otros objetos), se ha optado por utilizar una red de nailon equipada con flotadores y lastres para garantizar su estabilidad vertical. Respecto al diseño, se calculó la fuerza de arrastre nominal para una red de nailon de 5 metros de longitud, con una luz de malla de 25×25 mm y un grosor de hilo de 5 mm. Estas dimensiones establecen un área frontal proyectada de aproximadamente $0,25 \text{ m}^2$. Las simulaciones realizadas indican que la fuerza nominal total que ejerce la red es de 96 N, que puede ser manejada eficientemente por dos vehículos *Yellowfish*.

3. Modelado de un ASV

La dinámica en 3 grados de libertad (*degrees of freedom*, DOF) de un ASV se modela como en (1) Fossen (2011):

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

donde el vector $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ define la posición en el plano y la orientación, expresadas en el marco inercial $\{n\}$, mientras que $\nu = [u \ v \ r]^T$ recoge las velocidades de avance longitudinal (*surge*), lateral (*sway*), y rotacional (*yaw*), definidas en el marco solidario al cuerpo $\{b\}$. La transformación entre los marcos $\{b\}$ y $\{n\}$, mostrados en la Figura 2, se define mediante la matriz de rotación $\mathcal{R}$. El vector de acciones de control $\tau = [F_u \ 0 \ \tau_r]^T$, expresado también en $\{b\}$, recoge la fuerza y el par aplicados, donde se asume que no existe actuación en la dirección de *sway*, algo común en ASVs subactuados. La perturbación τ_w recoge los efectos externos sobre el ASV. Las matrices $\mathcal{M}$, $\mathcal{C}(\nu)$ y $\mathcal{D}(\nu)$ se refieren a la inercia, las fuerzas centrífugas y de Coriolis, y los efectos de amortiguamiento, respectivamente. Se asume que los efectos de gravedad y flotación sobre los DOF modelados son despreciables.

En seguimiento de caminos, se pretende guiar al ASV a lo largo de una trayectoria curvilínea η_{path} parametrizada por una variable de camino s , como se muestra en la Figura 2, mediante la minimización de los errores de seguimiento longitudinal x_e y transversal y_e definidos en el marco $\{F\}$. Este se asocia al camino deseado en el punto objetivo virtual $[x_P(s) \ y_P(s)]^T$, que se mueve continuamente a lo largo del camino. Los ejes de $\{F\}$ son tangenciales y ortogonales al camino en el punto

objetivo virtual. Los errores de seguimiento se definen en (2):

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_P) & -\sin(\phi_P) \\ \sin(\phi_P) & \cos(\phi_P) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x - x_P \\ y - y_P \end{bmatrix}, \quad (2)$$

donde el ángulo $\phi_P = \tan^{-1}(\dot{y}_P/\dot{x}_P) = \tan^{-1}(\frac{\partial y_P}{\partial s}/\frac{\partial x_P}{\partial s})$ define la orientación del camino en el punto objetivo virtual.

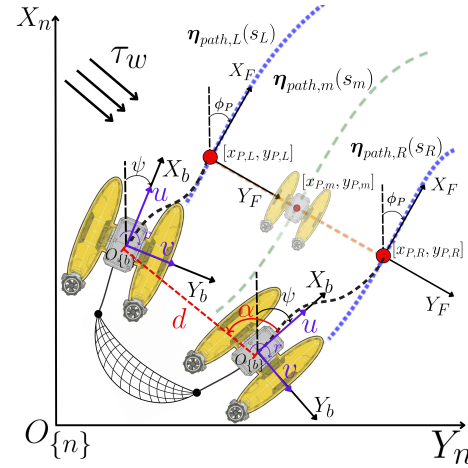


Figura 2: La flota de ASVs con marcos y variables relevantes.

4. Esquema de la estrategia de control propuesta

La estrategia de control propuesta, ilustrada en la Figura 3, se organiza jerárquicamente en cuatro bloques.

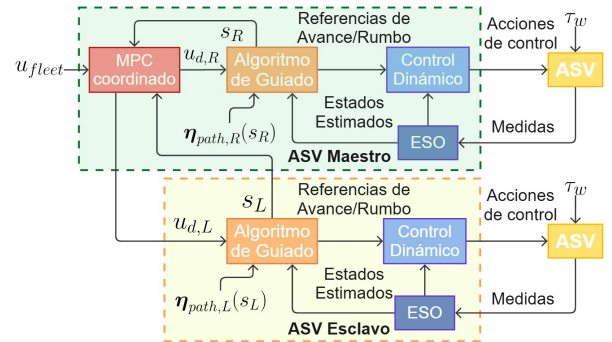


Figura 3: Estrategia propuesta de control jerárquico.

En primer lugar, los bloques azules de la Figura 3 corresponden a los módulos de navegación, que implementan observadores de estado extendido (*Extended State Observers*, ESO) encargados de estimar los estados no medidos y las perturbaciones generalizadas agregadas de cada ASV, a partir de las medidas disponibles y del modelo dinámico (1). Se emplea el ESO basado en zonótopos validado experimentalmente por Morel et al. (2025). En segundo lugar, el bloque rojo es el controlador MPC de alto nivel, descrito en la Sección 5, que coordina el avance de la flota y genera las referencias de *surge* u_d para cada ASV. En tercer lugar, los bloques naranja son los controladores de guiado, que generan las referencias de *surge* y de rumbo para cada ASV, en función de las trayectorias predefinidas, los estados estimados y el *surge* deseado u_d proporcionado por el controlador de alto nivel, actualizando

además la evolución temporal de la variable de camino s . Se aplica la ley de guiado *Surge-Guided* LOS, validada experimentalmente por Osorio et al. (2024). Por último, los bloques celestes representan los controladores dinámicos de bajo nivel, que calculan las acciones de control necesarias para seguir las referencias generadas por las leyes de guiado. Se aplica un controlador adaptativo robusto basado en *backstepping* validado experimentalmente por Gantiva-Osorio et al. (2025).

5. Control predictivo de alto nivel

5.1. Modelo de predicción

Se considera un sistema coordinado compuesto por tres agentes: un meta-vehículo virtual (denotado con el subíndice m) y dos ASVs, identificados como derecho (R) e izquierdo (L). El metavehículo representa el punto central de la línea recta virtual que une los dos ASVs y su definición se utiliza para coordinar su movimiento, imponiendo una única velocidad de avance para la flota. Cada agente (real o virtual) se modela como una partícula que evoluciona a lo largo de su trayectoria predefinida. Bajo esta formulación, el objetivo del controlador consiste en regular el avance coordinado de los vehículos a lo largo de sus respectivas trayectorias, como se muestra en la Figura 2. El vector de estado s y el vector de acciones de control u del modelo cooperativo se definen, respectivamente, como $s = [s_m \ s_R \ s_L]^T$ y $u = [u_{d,m} \ u_{d,R} \ u_{d,L}]^T$, donde s agrupa las variables de camino y u recoge las velocidades de *surge* que se asignarán a cada ASV. La cinemática discretizada viene dada por (3):

$$\begin{cases} s(k+1) = As(k) + Bu(k), \\ y(k) = Cs(k), \end{cases} \quad (3)$$

donde k representa el instante de muestreo actual e y es el vector de salida, definido como una combinación lineal de s . Las matrices del modelo se especifican en (4), donde T_m es el tiempo de muestreo, I la matriz identidad y $f_\delta = \sqrt{(\partial x_{P,\delta}/\partial s_\delta)^2 + (\partial y_{P,\delta}/\partial s_\delta)^2}$ la curvatura de la trayectoria del ASV δ en el punto objetivo virtual asociado a $s_\delta \forall \delta = m, R, L$.

$$A = I, B = T_m \begin{bmatrix} 1/f_m & 0 & 0 \\ 0 & 1/f_R & 0 \\ 0 & 0 & 1/f_L \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

5.2. Generación de referencias adaptativas

Tal como se muestra en la Figura 3, se define una única velocidad de avance para la flota u_{fleet} . Para trayectorias rectilíneas, la velocidad de referencia de cada ASV viene dada por $u_{ref,\delta} = u_{fleet}$, $\forall \delta = m, R, L$; en trayectorias curvas, esta se ajusta en función de la geometría según $u_{ref,\delta} = f_\delta/f_m \cdot u_{fleet}$ $\forall \delta = m, R, L$. El modelo (3) puede emplearse para generar los estados de referencia s_{ref} y las salidas y_{ref} a lo largo del horizonte de predicción N_p , a partir del vector nominal de velocidades deseadas $u_{ref} \equiv [u_{ref,m} \ u_{ref,R} \ u_{ref,L}]^T$. No obstante, dado que cada controlador de guiado puede modificar su punto objetivo virtual para lograr un seguimiento preciso de la trayectoria, es probable que se produzcan desviaciones entre la evolución deseada de dichos objetivos y la observada.

Para mitigar este efecto en el controlador coordinado, se introducen estados de referencia intermedios $s_a(k+j)$, $\forall j \in \mathbb{I}_1^{N_p}$, calculados de forma recursiva conforme a (5):

$$s_a(k+j) = As_a(k+j-1) + Bu_{ref}(k+j-1) - C_1 |s_{ref,L}(k) - s_L(k)| \mathbf{1}, \quad (5)$$

donde $C_1 > 0$ es la ganancia de adaptación, $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ es un vector unitario, y el ASV izquierdo se toma como referencia. El término correctivo es proporcional al valor absoluto del error de seguimiento medido en dicho vehículo, lo que permite ajustar la progresión de los estados de referencia en función de la magnitud de la discrepancia observada. A medida que el error aumenta, la evolución de los estados de referencia se ralentiza, lo que impide que el controlador imponga al sistema real demandas excesivas de *surge*. A partir de la secuencia de estados intermedios s_a , se obtienen los estados y salidas de referencia a lo largo del horizonte de predicción según (6):

$$\begin{cases} s_{ref}(k+1) = As_a(k) + Bu_{ref}(k), \\ y_{ref}(k) = Cs_{ref}(k). \end{cases} \quad (6)$$

Este algoritmo adaptativo actúa exclusivamente sobre la evolución futura de los estados y las salidas de referencia, sin modificar ni el modelo dinámico ni la estructura del MPC.

5.3. Restricciones

Se imponen restricciones sobre las salidas, las acciones de control y su tasa de variación a lo largo de los horizontes de predicción N_p y control N_c :

$$\hat{y}(j|k) \in \mathcal{Y} \equiv \{\hat{y}(j|k) : \underline{y} \leq \hat{y}(j|k) \leq \bar{y}\} \quad \forall j \in \mathbb{I}_1^{N_p}, \quad (7a)$$

$$u(j|k) \in \mathcal{U} \equiv \{u(j|k) : \underline{u} \leq u(j|k) \leq \bar{u}\} \quad \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_c-1}, \quad (7b)$$

$$\Delta u(j|k) \in \mathcal{U}_g \equiv \{u(j|k) : |\Delta u(j|k)| \leq \bar{\Delta u}\} \quad \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_c-1}, \quad (7c)$$

donde $\Delta u(j|k) = u(j|k) - u(j-1|k)$, siendo $u(-1|k)$ la acción de control aplicada en el instante anterior $k-1$. Los símbolos $(\cdot) \in \mathbb{R}^3$ y $(\bar{\cdot}) \in \mathbb{R}^3$ representan, respectivamente, los límites inferior y superior de las salidas, acciones de control e incrementos de estas. Las restricciones (7a) se emplean para limitar la distancia entre los puntos objetivo virtuales, garantizando así la integridad de la formación. Por su parte, (7b)–(7c) aseguran que las consignas de *surge* y sus tasas de variación permanezcan dentro de márgenes físicamente realizables, favoreciendo un comportamiento suave y evitando esfuerzos excesivos a los controladores individuales de los ASVs.

5.4. Función objetivo a minimizar

La función objetivo J_{N_p} se define en (8):

$$J_{N_p}(\hat{y}(k), u(k)) = \sum_{j=0}^{N_p-1} \ell(\hat{y}(j+1|k), u(j|k)) + V_f(\hat{y}(N_p|k)), \quad (8)$$

donde $u(k) \equiv \{u(j|k) \mid \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_c-1}\}$ denota la secuencia de acciones de control a lo largo del horizonte de control, calculada a partir de la información disponible en k . Las predicciones de salida a lo largo del horizonte de predicción $\hat{y}(k) \equiv \{\hat{y}(j+1|k) \mid \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_p-1}\}$ se obtienen mediante la aplicación recursiva del modelo (3), con condición inicial $\hat{s}(0|k) = s(k)$. Dado

que $N_c \leq N_p$, las acciones de control más allá del horizonte de control se mantienen iguales a la última acción de control optimizada, es decir, $\mathbf{u}(j|k) = \mathbf{u}(N_c - 1|k) \forall j \in \mathbb{I}_{N_c}^{N_p-1}$ (Camacho and Bordons, 2007). El coste de etapa de J_{N_p} se define en (9):

$$\ell(\hat{\mathbf{y}}(j+1|k), \mathbf{u}(j|k)) = \begin{cases} \|\mathbf{e}_y\|_{\mathbf{Q}} + \|\mathbf{e}_u\|_{\mathbf{R}} & j \in \mathbb{I}_0^{N_c-1}, \\ \|\mathbf{e}_y\|_{\mathbf{Q}} & j \in \mathbb{I}_{N_c}^{N_p-1}, \end{cases} \quad (9)$$

donde $\mathbf{e}_y \equiv \hat{\mathbf{y}}(j+1|k) - \mathbf{y}_{ref}(j+1|k)$ y $\mathbf{e}_u \equiv \mathbf{u}(j|k) - \mathbf{u}_{ref}(j|k)$. Las salidas de referencia $\mathbf{y}_{ref}$ empleadas en la función objetivo se generan mediante el mecanismo de generación de referencias adaptativas descrito en la Sección 5.2. Las matrices de ponderación $\mathbf{Q}$ y $\mathbf{R}$ son diagonales y semidefinidas positivas. Por último, el coste terminal de J_{N_p} se calcula como $V_f(\hat{\mathbf{y}}(N_p|k)) = \|\mathbf{e}_{y,f}\|_{\mathbf{P}}$, donde $\mathbf{P}$ es una matriz de ponderación semidefinida positiva y $\mathbf{e}_{y,f} \equiv \hat{\mathbf{y}}(N_p|k) - \mathbf{y}_{ref}(N_p|k)$.

5.5. Problema de optimización

El problema de optimización se formula en (10):

$$\min_{\mathbf{u}(k)} J_{N_p}(\hat{\mathbf{y}}(k), \mathbf{u}(k)), \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } \hat{\mathbf{s}}(0|k) = \mathbf{s}(k), \quad (10b)$$

$$\hat{\mathbf{s}}(j+1|k) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{s}}(j|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(j|k) \quad \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_p-1}, \quad (10c)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(j|k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{s}}(j|k) \quad \forall j \in \mathbb{I}_1^{N_p}, \quad (10d)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(j|k) \in \mathcal{Y} \quad \forall j \in \mathbb{I}_1^{N_p}, \quad (10e)$$

$$\mathbf{u}(j|k) \in \mathcal{U} \quad \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_c-1}, \quad (10f)$$

$$\Delta \mathbf{u}(j|k) \in \mathcal{U}_g \quad \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_c-1}, \quad (10g)$$

y se resuelve en cada instante de muestreo aplicando una estrategia de horizonte deslizante. En cada instante k se obtiene una secuencia óptima $\mathbf{u}^*(k) = \{\mathbf{u}^*(j|k) \forall j \in \mathbb{I}_0^{N_c-1}\}$, pero solo se aplica la primera acción de control $\mathbf{u}^*(0|k)$. En el siguiente instante de muestreo, se actualiza el vector de estado, se recalculan las referencias mediante el algoritmo descrito en la Sección 5.2 y se repite la optimización.

6. Resultados experimentales

Esta sección evalúa la estrategia de control propuesta mediante una prueba de trayectoria con dos ASVs. Los experimentos se llevaron a cabo en el Lago Mayor, Sevilla, durante ensayos con perturbaciones inducidas por el viento y las corrientes. Las mediciones del GNSS se transformaron a un sistema de referencia local con respecto a un origen fijo, lo que permitió analizar el movimiento coordinado de ambos ASVs a lo largo de sus trayectorias prescritas. La red de limpieza descrita en la Sección 2.2 se conectó a ambos ASVs.

La evaluación de desempeño se centra en los estados y las entradas del controlador MPC, junto con la distancia entre vehículos d y el ángulo relativo de la flota α , definidos gráficamente en la Figura 2, que cuantifican la preservación de la geometría de la flota. Todos los algoritmos se implementaron en los ordenadores a bordo Jetson. El problema de optimización del MPC (10) se resolvió mediante el *solver* Gurobi (Gurobi Optimization, LLC, 2025) bajo una licencia académica. Los

parámetros del MPC de alto nivel utilizados en el experimento reportado se resumen en la Tabla 1, donde se desactivaron las restricciones definidas en (7a) e impuestas en (10e).

Tabla 1: Parámetros del MPC de alto nivel

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$\mathbf{Q}$	$\text{diag}([0 \ 1 \ 1])$	$\frac{\mathbf{u}}{\bar{\mathbf{u}}}$	$0.2 \cdot [1 \ 1 \ 1]^T$
$\mathbf{R}$	$50 \cdot \text{diag}([1 \ 1 \ 1])$	$\frac{\Delta \mathbf{u}}{\bar{\Delta \mathbf{u}}}$	$[1 \ 1 \ 1]^T$
$\mathbf{P}$	$\text{diag}([0 \ 1 \ 1])$	T_m	$0.2 \cdot [1 \ 1 \ 1]^T$
N_p	10	C_1	1 s
N_c	10		0.08

Se consideran dos trayectorias cerradas paralelas separadas por 3 m, cada una con dos segmentos rectos y dos arcos de medio círculo, como se muestra en la Figura 4. Los horizontes N_p y N_c se eligieron teniendo en cuenta el rango de velocidades de *surge* alcanzables por los ASVs (hasta 1 m s^{-1}) y las trayectorias deseadas. En cuanto a las matrices de ponderación, $\mathbf{Q}$ penaliza ligeramente las desviaciones respecto a $\mathbf{y}_{ref}$, mientras que $\mathbf{R}$ se ajustó de forma más agresiva para penalizar en mayor medida la desviación de las velocidades de referencia de *surge* de cada ASV respecto a su velocidad deseada correspondiente, para mantener un avance estable y evitar un efecto de remolque muy variable. La ganancia C_1 se ajusta de manera conservadora para adaptar suavemente las salidas de referencia y favorecer un movimiento fluido de la flota.

La Figura 4 también muestra el desempeño del controlador propuesto. Ambos ASVs comienzan fuera de sus trayectorias prescritas y convergen hacia ellas a medida que se forma la configuración de remolque en paralelo. Las mayores desviaciones se producen en los segmentos curvos, donde la geometría de la flota se ve temporalmente afectada por la maniobra de giro y por la interacción con la red arrastrada.

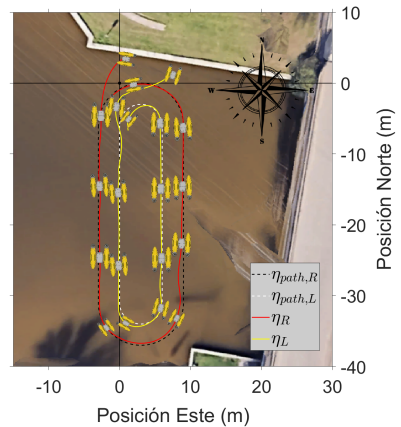


Figura 4: Desempeño del seguimiento de caminos.

Las Figuras 5 y 6 muestran las referencias de *surge* del MPC de alto nivel y las variables de camino, respectivamente. El controlador mantiene la progresión coordinada de los tres agentes, con s_R y s_L siguiendo la variable del metavehículo s_m tras el transitorio inicial. Los comandos de avance convergen a lo largo de los segmentos rectos y difieren en las curvas, donde el MPC compensa las distintas longitudes de trayectoria requeridas para preservar la formación. La Figura 7 muestra

la distancia entre vehículos d y el ángulo relativo α , definidos gráficamente en la Figura 2. La formación deseada ($d_d = 3$ m, $\alpha_d = -90^\circ$) se alcanza aproximadamente en $t = 25$ s, justo antes de la primera curva. La distancia permanece casi constante a partir de entonces, salvo en las curvas en $t = 140$ s y $t = 225$ s. Las desviaciones se observan principalmente en las curvas, donde la red y los comandos de avance diferencial deforman temporalmente la formación.

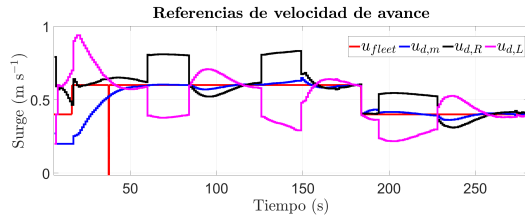


Figura 5: Referencias de surge dadas por el MPC de alto nivel

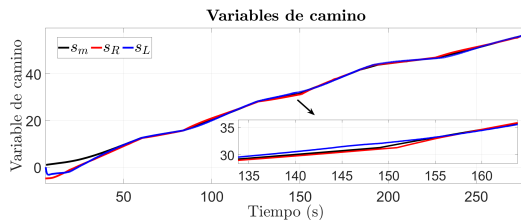


Figura 6: Evolución de las variables de camino

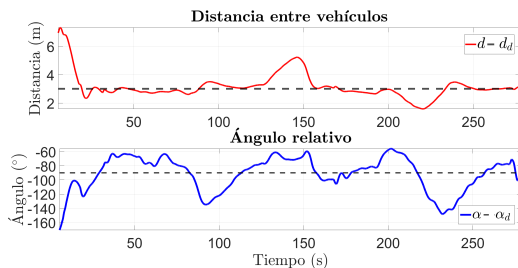


Figura 7: Distancia intervehicular y ángulo relativo.

7. Conclusiones y trabajos futuros

Se presenta la validación experimental de un sistema cooperativo de limpieza acuática basado en dos ASVs que remolcan una red de recogida de residuos flotantes. Se implementó, en condiciones reales, un controlador jerárquico que integra observadores de estado, leyes de guiado y una capa predictiva de alto nivel. Los resultados experimentales muestran un movimiento coordinado tanto en trayectorias rectilíneas como en curvilíneas, manteniendo la formación pese a las perturbaciones ambientales y al efecto de remolque. El controlador predictivo regula eficazmente el avance relativo de los vehículos y los controladores de bajo nivel garantizan un comportamiento individual estable y robusto.

Como trabajo futuro, se plantea ampliar la validación experimental a otros dispositivos de limpieza, como barreras de absorción de hidrocarburos. Asimismo, se incorporarán modelos explícitos del dispositivo remolcado en el controlador de alto nivel, junto con módulos de percepción para la detección y el seguimiento autónomo de residuos superficiales.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Proyecto CON-DOR, PID2024-158365OB-C22, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033. Agradecemos a la Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía su colaboración en las pruebas experimentales en el Lago Mayor.

Referencias

- Arrichiello, F., Heidarsson, H. K., Chiaverini, S., Sukhatme, G. S., 2012. Cooperative caging and transport using autonomous aquatic surface vehicles. In: *Intell. Serv. Robot.* Vol. 5. pp. 73–87. DOI: 10.1007/s11370-011-0104-9
- Bejarano, G., Manzano, J. M., Salvador, J. R., Limon, D., 2022. Nonlinear model predictive control-based guidance law for path following of unmanned surface vehicles. *Ocean Eng.* 258 (111764). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111764
- Breivik, M., 2010. Topics in guided motion control of marine vehicles. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Camacho, E., Bordons, C., 2007. *Model predictive control*, 2nd Edition. Springer Verlag London Limited.
- Fossen, T. I., 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, London, U.K.
- Gantiva Osorio, M., Ierardi, C., Jurado Flores, I., Pereira Martín, M., Millán Gata, P., 2024. Coordinated control of multiple autonomous surface vehicles: Challenges and advances — a systematic review. *Ocean Eng.* 312 (119160). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119160
- Gantiva-Osorio, M., Morel, T., Bejarano, G., Millán, P., Peralta Samaniego, F., 2026. From Concept to Control: Development of an Advanced ASV Platform for Testing. In: *Gutiérrez, D., Millán, P., Blasco, J. (Eds.), Smart Water Quality Monitoring*, 1st Edition. Springer Cham, p. 323–374. DOI: 10.1007/978-3-032-03049-8_11
- Gantiva-Osorio, M., Morel, T., Orihuela, L., Bejarano, G., Gata, P. M., 2025. Experimental Evaluation of Backstepping Speed Control for an Autonomous Marine Vehicle with Set-Membership Extended State Observer. In: *2025 Int. Conf. Mechatron. Robot. Eng. (ICMRE)*. p. 364–369. DOI: 10.1109/ICMRE64970.2025.10976297
- Giron-Sierra, J., Jiménez, J., Domínguez, A., Riola, J., De la Cruz, J., de Andres-Toro, B., 2005. A cooperation scenario in the marine environment: First outlook. *IFAC Proc.* Vol. 38 (1), 37–42, 16th IFAC World Congr. DOI: 10.3182/20050703-6-CZ-1902.01948
- Giron-Sierra, J. M., Gheorghita, A. T., Angulo, G., Jimenez, J. F., 2015. Preparing the automatic spill recovery by two unmanned boats towing a boom: Development with scale experiments. *Ocean Eng.* 95, 23–33. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.11.034
- Gurobi Optimization, LLC, 2025. *Gurobi Optimizer Reference Manual*. URL: <https://www.gurobi.com>
- Liu, L., Wang, D., Peng, Z., 2019. State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers. *Ocean Eng.* 171, 625–632. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.11.008
- Morel, T., Gantiva-Osorio, M., Bejarano, G., Millán, P., Orihuela, L., Combastel, C., 2025. Experimental Validation of a Partially Decoupled Extended Observer for Set-Membership State Estimation on an Autonomous Surface Vehicle. In: *2025 Int. Conf. Mechatron. Robot. Eng. (ICMRE)*. p. 169–174. DOI: 10.1109/ICMRE64970.2025.10976310
- Osorio, M. G., Bejarano, G., Gata, P. M., 2024. Validación de ley de guiado para vehículos autónomos de superficie. *Rev. Iberoam. Autom. Inf. Ind.* 22 (2), 93–103. DOI: 10.4995/riai.2024.21949
- Rajendran, K., Suresh Kumar, P., Sivaraman, M., et al., 2024. A critical review of microplastics in aquatic ecosystems: Occurrence, fate, impacts, and remediation strategies. *Sci. Total Environ.* 923, 171234. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171234
- Wang, J., Ren, F., Li, Z., Liu, Z., Zheng, X., Yang, Y., 2016. Unmanned surface vessel for monitoring and recovering of spilled oil on water. In: *OCEANS 2016*. pp. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485405