

# Jornadas de Automática

## Control distribuido de un escudo semiesférico de drones para la denegación de acceso a un área de interés

Zaragoza-Noguera, Salvador<sup>a</sup>, Guinaldo-Losada, María<sup>b</sup>, Sánchez-Moreno, José<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Centro Universitario de la Defensa (CUD). C/ Coronel López Peña s/n, 30729 Santiago de la Ribera, Murcia, España.

<sup>b</sup> Departamento de Informática y Automática, UNED. C/ Juan del Rosal 16, 28040 Madrid, España.

**To cite this article:** Zaragoza-Noguera, S., Guinaldo-Losada, M., Sánchez-Moreno, J. 2026. Distributed control of a hemispherical drone shield for access denial to an area of interest. *Jornadas de Automática*, 47.  
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13461>

### Resumen

En este artículo se aborda el problema de la denegación de acceso a un área de interés mediante un enjambre de drones defensores con dinámica de integrador simple que adoptan una formación de escudo semiesférico rígido sobre una superficie cuadrática virtual. La ley de control distribuida, basada en el gradiente de una función de potencial, garantiza simultáneamente la adquisición de la formación, el mantenimiento de las distancias deseadas entre drones y su posicionamiento sobre la superficie virtual. A partir de esta ley de control, se derivan las expresiones de velocidad lineal y angular que debe adquirir el centro del escudo para interponerse entre el objetivo protegido y el enjambre hostil, considerando un objetivo en movimiento. Adicionalmente, se analiza la capacidad de modificar dinámicamente el radio del escudo durante la operación, identificando las limitaciones que aparecen cuando la modificación del factor de escala es anisotrópica. Los resultados de simulación validan el enfoque en escenarios de formación, modificación dinámica del radio y denegación de acceso, este último bajo dos condiciones: una ideal con posiciones exactas y otra realista con sensores ruidosos, obteniéndose errores de formación del orden de  $10^{-2}$  m y errores de orientación inferiores a  $0.1^\circ$ .

**Palabras clave:** Sistemas autónomos, Navegación cooperativa, Control distribuido, Consenso, Vehículos aéreos no tripulados

### Distributed control of a hemispherical drone shield for access denial to an area of interest

### Abstract

This paper addresses the problem of access denial to an area of interest using a swarm of defending drones with single integrator dynamics that adopt a rigid hemispherical shield formation on a virtual quadratic surface. The distributed control law, based on the gradient of a potential function, simultaneously guarantees formation acquisition, maintenance of desired inter-drone distances, and positioning on the virtual surface. From this control law, the linear and angular velocity expressions required for the shield center to interpose between the protected target and the hostile swarm are derived, considering a moving target scenario. Additionally, the ability to dynamically modify the shield radius during operation is analyzed, identifying the limitations that arise when the scaling factor modification is anisotropic. Simulation results validate the approach in formation, dynamic radius modification, and access denial scenarios, the latter under two conditions: an ideal one with exact positions and a more realistic one with noisy sensors, yielding formation errors on the order of  $10^{-2}$  m and orientation errors below  $0.1^\circ$ .

**Keywords:** Autonomous systems, Cooperative navigation, Distributed control, Consensus, UAVs

### 1. Introducción

La protección de infraestructuras críticas frente a ataques de drones pequeños (UAS-LSS – *Unmanned Aerial System Low, Small, and Slow*) constituye un reto creciente (Hua, *et al.*, 2024). Para hacer frente a esta amenaza se han desarrollado estrategias C-UAS (*Counter-Unmanned Air Systems*) basadas en la interferencia de señales, láseres, microondas de alta energía o munición convencional (ETID,

2020), cuya efectividad varía en función del escenario.

En (Guinaldo, *et al.*, 2024) y (Zaragoza-Noguera, *et al.*, 2025) se propuso, en el contexto más amplio de la coordinación de sistemas multiagente (Olfati-Saber, *et al.*, 2007; Ren y Sorensen, 2008), una solución alternativa basada en un enjambre de drones defensores que adoptan una formación de escudo semiesférico rígido, construido mediante triangulación de Delaunay sobre una superficie cuadrática virtual. En dichos trabajos, la dinámica de los drones se modeló como un

integrador simple y se diseñó la ley de control de la formación. El presente artículo retoma el modelo de integrador simple y completa el tratamiento de la denegación de acceso con tres aportaciones: la formulación para objetivo móvil con las expresiones de velocidad lineal y angular del escudo, la modificación dinámica del radio del escudo, y un escenario realista con sensores ruidosos, filtro de Kalman de 18 estados y consenso distribuido. La ley de control se diseña mediante el gradiente de una función de potencial que garantiza la adquisición de la formación y la estabilidad asintótica local.

El artículo se organiza como sigue: la Sección 2 describe el sistema, la Sección 3 resume la ley de control, la Sección 4 formula la denegación de acceso, la Sección 5 presenta las simulaciones y la Sección 6 recoge las conclusiones.

## 2. Descripción del sistema

Se consideran  $N$  drones defensores desplegados sobre un escudo semiesférico virtual  $S$  de radio  $R_s$ , cuyo centro se localiza en  $p_0(t)$ . La formación se describe mediante un marco  $F(t) = (G, p(t))$ , donde  $G = (V, E)$  es un grafo con aristas establecidas mediante triangulación de Delaunay, garantizando la rigidez infinitesimal (Eren, *et al.*, 2002; Guinaldo, *et al.*, 2024). La superficie cuadrática es  $f_s(p_i | p_0) = p_{i0}^T Q_1 p_{i0} - 1 = 0$ , con  $p_{i0} = p_i - p_0$  y  $Q_1 = (1/R_s^2)I_3$ . Para una revisión de las técnicas de control de formaciones multiagente, véase (Oh, *et al.*, 2015; Anderson, *et al.*, 2008; Queiroz, *et al.*, 2019). Para la teoría de grafos y formaciones rígidas, véase (Zaragoza-Noguera, *et al.*, 2025) y (Guinaldo, *et al.*, 2024).

La dinámica de cada dron defensor  $i$  se modela como un integrador simple:  $\dot{p}_i = u_i(t)$ , con  $i = 1, \dots, N$ , donde  $p_i(t) \in \mathbb{R}^3$  es la posición y  $u_i(t) \in \mathbb{R}^3$  la señal de control. Este modelo es operativamente realista, dado que los autopilotos comerciales (PX4, ArduPilot) aceptan consignas de velocidad como entrada de alto nivel, gestionando internamente el lazo de control de actitud y dinámica del vehículo. El objetivo, denotado por el subíndice *obj*, tiene velocidad  $v_{obj}$ . El centro de masas del enjambre hostil es  $p_h$  con velocidad  $v_h$ . Para describir el movimiento del escudo como sólido rígido (traslación y rotación), se introduce un dron virtual que representa el centro de la superficie cuadrática y forma parte de la formación aumentada de drones. Su función es definir el punto de referencia respecto al cual se calculan las posiciones relativas de los drones reales y las distancias deseadas sobre la superficie cuadrática. El dron virtual se corresponde con la posición del centro de la base del escudo semiesférico, que coincide con el centro de la superficie cuadrática, y tiene posición  $p_0$ , velocidad  $v_0$  y velocidad angular  $\omega_0$ . Se asume que cada dron defensor dispone de un sensor para medir la posición del dron hostil y del objetivo.

## 3. Ley de control

### 3.1. Ley de control de formación

Para el integrador simple, la ley de control de cada dron  $i$  se diseña para mantener las distancias deseadas con sus vecinos y posicionar al dron sobre la superficie cuadrática

virtual. Se define la función potencial  $W = \frac{k_1}{4} \sum (d_{ij}^2 - d_{ij}^{*2})^2 + \frac{k_2}{4} \sum (f_s(p_i, p_0))^2$ , donde  $d_{ij}$  es la distancia entre drones y  $d_{ij}^*$  la deseada. La ley de control (Zaragoza-Noguera, *et al.*, 2025) se obtiene por el gradiente negativo:  $u_i = -k_1 \cdot \sum p_{ij} z_{ij} - \frac{k_2}{2} \frac{\partial f_s}{\partial p_i} f_s$ , donde  $p_{ij} = p_i - p_j$  y  $z_{ij} = d_{ij}^2 - d_{ij}^{*2}$ .

### 3.2. Estabilidad

**Teorema 1.** La ley de control  $u_{f,i} = -k_1 \cdot \sum p_{ij} z_{ij} - \frac{k_2}{2} \frac{\partial f_s}{\partial p_i} f_s$ , con  $p_0$  fijo, es localmente asintóticamente estable. La demostración usa la función de Lyapunov  $W$ , cuya derivada resulta  $dW/dt \leq 0$  (Zaragoza-Noguera, *et al.*, 2025).

### 3.3. Extensión al escudo en movimiento

Cuando el escudo se mueve con velocidad  $v_0$  y velocidad angular  $\omega_0$ , la ley de control de cada dron  $i$  incorpora la velocidad deseada del dron sobre el escudo:  $u_i = v_{d,i} + u_{f,i}$ , donde  $v_{d,i} = v_0 + \omega_0 \times p_{i0}$  es la velocidad debida al movimiento del escudo (traslación y rotación) y  $u_{f,i}$  es la señal de formación del Teorema 1.

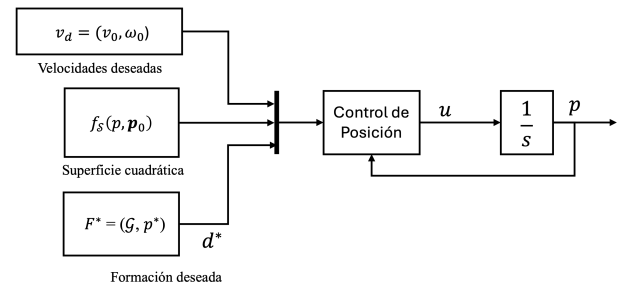


FIGURA 1: Esquema del controlador para formar, desplazar y rotar el escudo.

A esta expresión se añaden dos términos adicionales. El primero es un término repulsivo que mantiene los drones por encima del terreno ( $Z > 0$ ):

$$u_{rep,i} = -(0, 0, 1)^T \cdot k_3 \frac{1}{p_{z,i}^3}$$

donde  $k_3 > 0$  es la ganancia repulsiva y  $p_{z,i}$  la componente vertical de la posición del dron  $i$ . El segundo término corrige la orientación de la formación y solo se aplica al dron del vértice del escudo ( $i = 1$ ):

$$u_{rot,1} = -k_4(v_1 - v_2)$$

donde  $k_4 > 0$  es una ganancia,  $v_1$  es la dirección de orientación deseada de la formación y  $v_2$  la dirección real. Cuando el escudo se desplaza libremente (Secciones 5.1 y 5.2),  $v_1$  apunta en la dirección del eje de simetría de la semiesfera y  $v_2 = p_1 - p_0$ . En el escenario de denegación de acceso (Sección 5.3),  $v_1 = p_h - p_v$  y  $v_2 = p_h - p_1$ , con  $p_v$  siendo el punto de la superficie que está sobre la recta  $\overline{p_h p_{obj}}$ , de forma que el vértice del escudo se orienta hacia el dron hostil. La ley de control completa (Figura 1) es:

$$\begin{cases} u_i = v_{d,i} + u_{f,i} + u_{rep,i} + u_{rot,1}, & i = 1 \\ u_i = v_{d,i} + u_{f,i} + u_{rep,i}, & i \neq 1 \end{cases}$$

#### 4. Denegación de acceso por interposición del escudo

Se desea aplicar la ley de control distribuida para que una formación de drones defensores, desplegada sobre el escudo virtual semiesférico  $S_s$  de radio  $R_s$ , deniegue la entrada a un enjambre de drones hostiles en un volumen definido por una cúpula defensiva  $S_c$  de radio  $R_c$  centrada en el objetivo a proteger. El centro del escudo se desplaza sobre la superficie de  $S_c$  de forma que pertenezca en todo momento a la recta que une el objetivo y el centro de masas del enjambre hostil, manteniendo la ortogonalidad con dicha recta. El esquema de control modificado (Figura 2) recibe como entradas las velocidades lineales y angulares deseadas del centro del escudo, generadas por un módulo de interposición a partir de las variables de estado del enjambre hostil y del objetivo. De esta forma, el escudo semiesférico centrado en  $p_0$  se interpone entre el dron hostil y el objetivo, bloqueando cualquier trayectoria rectilínea del hostil hacia el objetivo protegido.

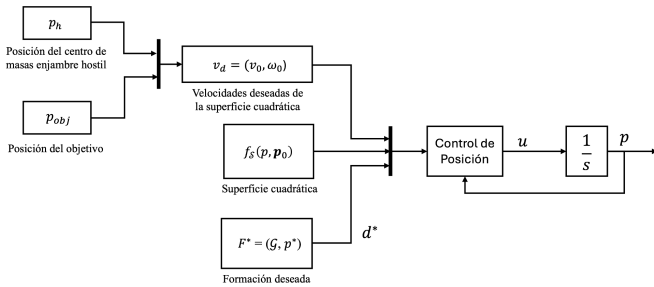


FIGURA 2: Modificación del controlador para denegación.

##### 4.1. Velocidad lineal y angular del escudo

Las velocidades deseadas del escudo virtual se obtienen a partir de las posiciones y velocidades del dron hostil y del objetivo a proteger. La Proposición 1 proporciona la velocidad lineal del centro del escudo y la Proposición 2 la velocidad angular necesaria para mantener la ortogonalidad.

**Proposición 1.** Siendo  $p_h$  y  $v_h$  la posición y velocidad del dron hostil,  $p_{obj}$  y  $v_{obj}$  la posición y velocidad del objetivo, y  $p_0$  la posición del dron virtual en la recta definida por  $p_h$  y  $p_{obj}$ , la velocidad  $v_0$  que el dron virtual debe poseer para permanecer sobre la cúpula defensiva  $S_c$  de radio  $R_c$  y pertenecer a dicha recta es:  $v_0 = v_{obj} + \frac{R_c}{\|p_{hobj}\|} (v_{hobj} - \hat{v}_1(\hat{v}_1^T v_{hobj}))$ , donde  $p_{hobj} = p_h - p_{obj}$ ,  $v_{hobj} = v_h - v_{obj}$  y  $\hat{v}_1 = \frac{p_{hobj}}{\|p_{hobj}\|}$  es el vector unitario de la recta que une el objetivo y el dron hostil.

**Demostración.** La posición del dron virtual respecto al objetivo es  $p_{0,obj} = R_c \hat{v}_1$ . Derivando y desarrollando la derivada del vector unitario  $\frac{d\hat{v}_1}{dt} = \frac{1}{\|p_{hobj}\|} (v_{hobj} - \hat{v}_1(\hat{v}_1^T v_{hobj}))$ , se obtiene  $v_0 - v_{obj} = \frac{R_c}{\|p_{hobj}\|} (v_{hobj} - \hat{v}_1(\hat{v}_1^T v_{hobj}))$ . ■

**Proposición 2.** La velocidad angular necesaria para que la base de la superficie cuadrática virtual mantenga la ortogonalidad con la recta que une el objetivo y el dron hostil es:  $\omega_0 = \hat{v}_1 \times \frac{d\hat{v}_1}{dt}$ .

**Demostración.** La velocidad de un sólido rígido rotando a  $\omega_0$  es  $\frac{d\hat{v}_1}{dt} = \omega_0 \times \hat{v}_1$ . Multiplicando vectorialmente por  $\hat{v}_1$  y usando la identidad BAC-CAB con  $\|\hat{v}_1\| = 1$  y  $\omega_0 \perp \hat{v}_1$  se obtiene  $\omega_0 = \hat{v}_1 \times \frac{d\hat{v}_1}{dt}$ . ■

Las expresiones de las Proposiciones 1 y 2, junto con la velocidad del dron virtual  $v_{d,i} = v_0 + \omega_0 \times p_{i0}$ , proporcionan las entradas necesarias para la ley de control (Figura 2).

##### 4.2. Término correctivo de alineación

La ecuación de la Proposición 1 no proporciona una  $v_0$  correcta cuando los sensores de los drones no son ideales, ya que el ruido de medición provoca que la posición estimada no sea la real. En este caso, para obtener la velocidad correcta, se añade un término que retroalimenta el error de alineación entre el objetivo, el dron virtual y el dron hostil de forma proporcional:

$$e_v = k_e \left( \frac{R_c}{\|p_{hobj}\|} p_{hobj} - (p_0 - p_{obj}) \right),$$

donde  $p_{hobj} = p_h - p_{obj}$  es el vector que une las posiciones del objetivo y del dron hostil y  $k_e > 0$ . Por tanto, en escenarios con sensores ruidosos, la expresión de la velocidad del dron virtual que sustituye a la de la Proposición 1 es:

$$v_0 = v_{obj} + \frac{R_c}{\|p_{hobj}\|} (v_{hobj} - \hat{v}_1(\hat{v}_1^T v_{hobj})) + e_v.$$

##### 4.3. Filtro de Kalman y consenso distribuido

En el escenario realista, cada dron del escudo defensivo obtiene una medición ruidosa de la posición del dron hostil y del objetivo. Mediante un filtro de Kalman discreto de 18 estados, cada dron estima las posiciones, velocidades y aceleraciones de ambos móviles. Se utiliza un filtro de 18 estados en lugar de 12 porque estima mejor las trayectorias con aceleración variable (espirales, parábolas), reduciendo el error RMS de posición de 13 m a 0.07 m en trayectorias espirales.

El vector de estado estimado incluye posición, velocidad y aceleración del dron hostil y del objetivo:  $x_{est} = (p_h, v_h, a_h, p_{obj}, v_{obj}, a_{obj}) \in \mathbb{R}^{18}$ . La matriz de transición adopta una estructura diagonal por bloques de  $9 \times 9$  correspondiente a un modelo cinemático de aceleración constante. La matriz de observación  $H \in \mathbb{R}^{6 \times 18}$  extrae las posiciones de ambos móviles. El ruido de medición se modela con desviación típica  $\sigma = 0.2$  m. Este valor es representativo del error de localización de sistemas de visión artificial embarcados en drones de pequeño tamaño, que a distancias de trabajo del orden de 20–50 m presentan errores de posicionamiento típicos entre 0.1 y 0.5 m, debidos fundamentalmente a la incertidumbre en la estimación de profundidad con cámaras monoculares (Rodríguez-Canosa, et al., 2012). En escenarios con objetivo cooperativo, podría emplearse UWB (Ultra-Wideband), cuya precisión en ranging (10–30 cm) es igualmente compatible con el nivel de ruido considerado (Alarifi, et al., 2016).

Las estimaciones individuales se consensúan entre los drones mediante un protocolo de consenso distribuido a través de la matriz laplaciana  $L$  del grafo de comunicación, establecido mediante triangulación de Delaunay:  $\dot{x}_{cons} = \alpha(L \otimes I_{18})x_{est}$ , donde  $\alpha = \frac{1}{\lambda_{max}(L)}$  es el factor de convergencia. Las variables de estado consensuadas se utilizan para calcular las velocidades deseadas del escudo según las Proposiciones 1 y 2, incluyendo el término correctivo de alineación:

$$e_v = k_e \left( \frac{R_c}{\|p_{hobj,cons}\|} p_{hobj,cons} - (p_0 - p_{obj,cons}) \right)$$

con  $p_{hobj,cons} = p_{h,cons} - p_{obj,cons}$ . Se tiene así:

$$v_0 = v_{obj,cons} + \frac{R_c}{\|p_{hobj,cons}\|} (v_{hobj,cons} - \hat{v}_1(\hat{v}_1^T v_{hobj,cons})) + e_v.$$

## 5. Simulaciones

Los parámetros comunes a todas las simulaciones son:  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 500$ ,  $k_3 = 0.01$ ,  $k_4 = 100$ ,  $k_e = 5$ ;  $R_s = 5$ ;  $dt = 5 \cdot 10^{-4}$  s; superficie y escudo semiesféricos.

### 5.1. Formación con velocidades constantes

Se simula un escudo de siete drones con  $v_0 = [0, 3, 5]$  m/s y  $\omega_0 = [1, 0.5, 0]$  rad/s durante 5 s. El escudo se construye mediante proyección estereográfica sobre la superficie cuadrática virtual. En el instante inicial, las posiciones de los drones se perturban respecto a las posiciones deseadas, de modo que las distancias entre drones no son las correctas ni los drones se encuentran sobre la superficie cuadrática. En la Figura 3 se aprecia cómo se va adquiriendo la formación correcta y los errores de distancia y superficie se anulan a partir de  $t = 2.5$  s. El error de orientación medio en régimen permanente es  $0.03^\circ$  (Figura 4).

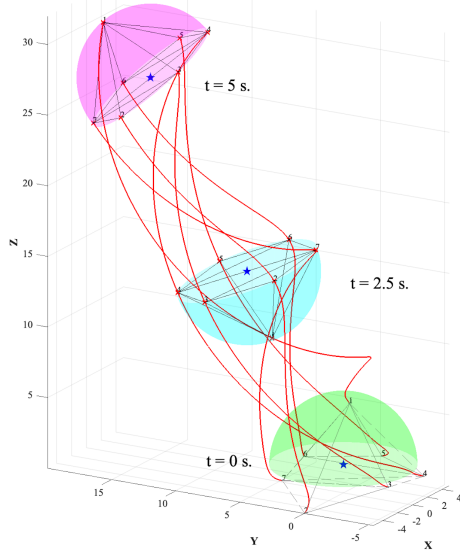


FIGURA 3: Evolución del escudo con velocidades y radio constantes.

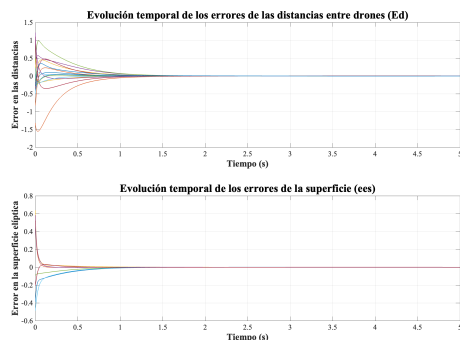


FIGURA 4: Errores de distancia y superficie.

### 5.2. Modificación dinámica del radio del escudo

Una de las ventajas de la formulación es que permite modificar dinámicamente el radio del escudo. Esto es relevante en escenarios donde el tamaño de la formación debe adaptarse para concentrar la defensa o cubrir un área mayor.

Se simula un escudo de siete drones cuyas velocidades son  $v_0 = [3, 0, 4]$  m/s y  $\omega_0 = [-2, 1, 0.5]$  rad/s. El radio inicial  $R_s$  se reduce en  $t = 1.25$  s a 2.5 (factor de escala  $s = 0.5$ ) y en  $t = 3$  s se amplía a 7.5. La Figura 5 muestra la trayectoria de la formación. La ley de control varía el radio del escudo manteniendo las nuevas distancias deseadas y ajustándose a la superficie redimensionada.

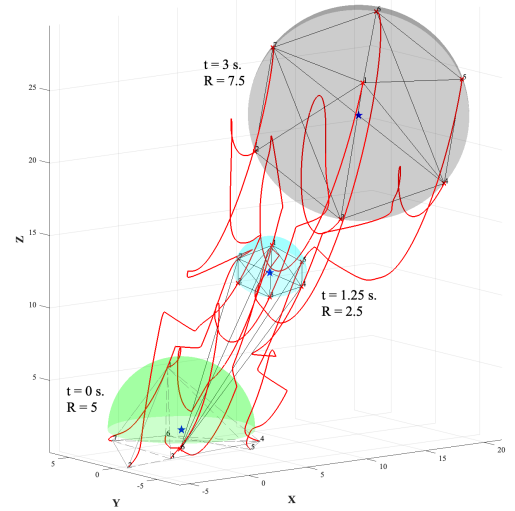


FIGURA 5: Evolución del escudo de siete drones con velocidades constantes y radio variable.

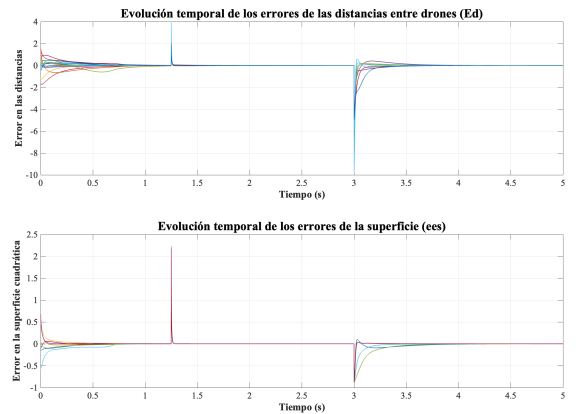


FIGURA 6: Errores de distancia y superficie con radio variable.

La Figura 6 muestra que en la primera modificación ( $t = 1.25$  s) el esfuerzo de control es bajo y la reconfiguración se realiza sin que crezca el error de orientación. En cambio, en  $t = 3$  s el esfuerzo y el error crecen significativamente al incrementarse el radio un 200% con velocidades elevadas. No obstante, el error de orientación recupera valores próximos a  $0.1^\circ$  en régimen permanente. Estos resultados demuestran que la ley de control gestiona reconfiguraciones dinámicas del radio cuando se mantiene la simetría esférica de la superficie.

No obstante, la modificación del factor de escala presenta limitaciones. Cuando se modifica la escala de forma anisotrópica

(alterando la relación entre semiejes) y simultáneamente se rota el escudo sobre un eje que no coincide con un eje de simetría de la nueva superficie, la ley de control no consigue ajustar la formación de drones sobre la superficie virtual. Bajo estas condiciones, los errores de distancia entre drones, los errores de superficie y el error de orientación presentan una dinámica cuasi-sinusoidal que no converge a cero (Figura 7). La causa es que el movimiento angular se produce sobre un eje que no preserva la simetría de la superficie modificada. Este problema no aparece cuando la rotación se realiza sobre el eje de simetría de la superficie o cuando la modificación del radio es uniforme (isótropa), como en la simulación anterior.

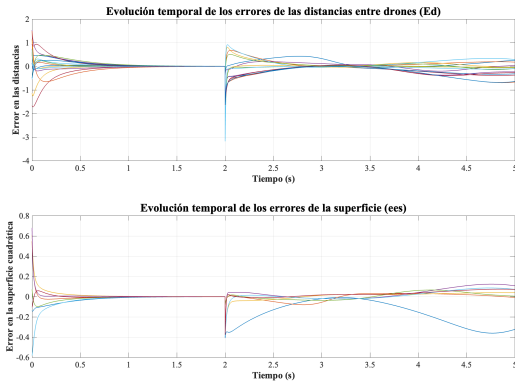


FIGURA 7: Fallo del controlador con cambio de escala anisotrópico y rotación sobre eje no simétrico. Errores con  $\omega_0 = [0, 1, 0]$  rad/s y cambio de escala  $s = 0.5$  en  $t = 2$  s.

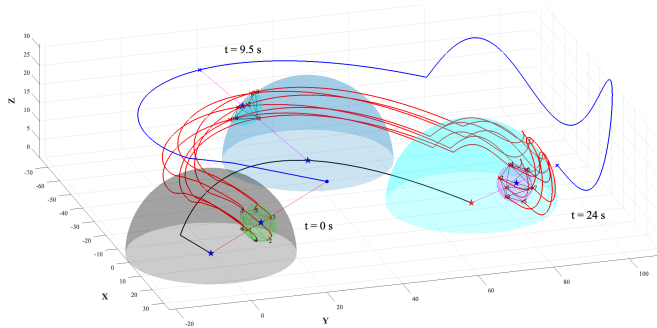


FIGURA 8: Trayectorias del dron hostil (línea azul), el objetivo (línea negra) y el escudo defensivo (líneas rojas).

### 5.3. Denegación de acceso a un área de interés

Se ha realizado la misma simulación bajo dos escenarios distintos que muestran la evolución de un escudo defensivo formado por siete drones que deniega el acceso a un dron hostil (que representa el centro de masas de un enjambre hostil) a un espacio de seguridad alrededor del objetivo que protege. El radio del escudo es  $R_s = 5$  m, el radio de la cúpula defensiva  $R_c = 21.67$  m y la duración es 24 s. Las trayectorias del dron hostil y del objetivo son complejas: el dron hostil realiza sucesivamente un descenso lineal, una deceleración, una espiral descendente centrada en el objetivo y un movimiento circular sinusoidal; el objetivo ejecuta un tramo lineal, una parábola de evasión y permanece inmóvil en los últimos 10 s. En el escenario 1, la ley de control utiliza las posiciones reales (sin ruido); en el escenario 2, cada dron estima las variables de estado mediante un filtro de Kalman

de 18 estados y las consensúa con sus vecinos. Ambos escenarios incluyen el término correctivo  $e_p$ ; en el escenario 2, este se calcula con las variables consensuadas (Sección 4.3).

#### 5.3.1. Escenario 1: Posiciones reales

La Figura 8 muestra las trayectorias del dron hostil, el objetivo y el escudo defensivo. Se aprecia que el escudo se interpone correctamente entre ambos en todo momento, con la orientación adecuada. Se ha utilizado el solver ode15s para resolver las rigideces transitorias que aparecen durante la trayectoria espiral ( $t = 4-14$  s), donde el solver ode45 producía rizado en las señales de control debido a pasos de rechazo.

La Figura 9 muestra los errores de distancia entre drones y de separación con la superficie del escudo. Tras un transitorio inicial elevado (los drones parten de posiciones perturbadas), los errores convergen rápidamente a cero de forma monótona. El error medio de orientación es de  $0.0335^\circ$ , lo que indica un rápido establecimiento de la orientación correcta. La separación entre el dron virtual y la cúpula defensiva no supera los 2 cm y el dron hostil no penetra en ningún momento la cúpula de seguridad, siendo su máximo acercamiento de aproximadamente 12 m.

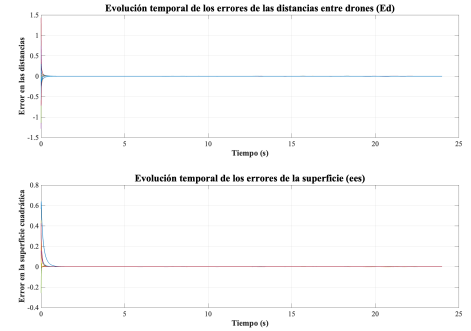


FIGURA 9: Errores de distancias entre drones y de separación con la superficie del escudo.

#### 5.3.2. Escenario 2: Filtro de Kalman y consenso distribuido

La Figura 10 muestra las trayectorias del sistema con estimaciones consensuadas. No se aprecian diferencias significativas respecto al escenario 1, lo que confirma el buen funcionamiento del filtro de Kalman y el proceso de consenso. La convergencia del consenso se produce en menos de 1 s, reduciendo la dispersión en dos órdenes de magnitud para las posiciones y en tres para las velocidades. La precisión en la estimación de posición es inferior a 7 cm de error para un móvil que se desplaza a velocidades de 7–15 m/s.

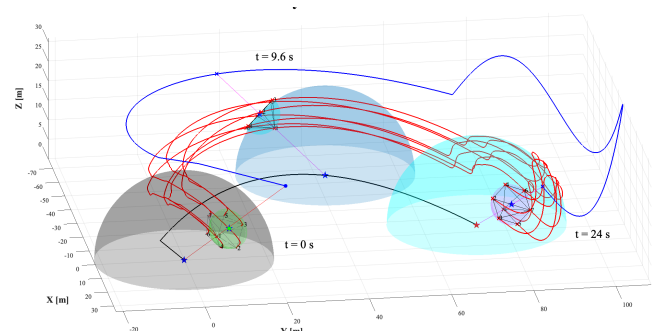


FIGURA 10: Trayectorias del dron hostil (línea azul), el objetivo (línea negra) y el escudo defensivo (líneas rojas), con filtro de Kalman y consenso distribuido.

La Figura 11 muestra los errores de distancia y de superficie. Los transitorios iniciales desaparecen en menos de 2 s. En régimen permanente, los errores de distancia entre drones se mantienen por debajo de  $\pm 0.1$  m (2% del radio del escudo), el error medio de distancia a la superficie es de  $0.0002$  m<sup>2</sup> y el error medio de orientación es de  $0.135^\circ$ . Estas diferencias respecto al escenario 1 son atribuibles al ruido de estimación y al retardo intrínseco del filtro de Kalman en los instantes de cambio de trayectoria. La separación entre el dron virtual y la cúpula presenta un offset de aproximadamente 0.15 m, que se incrementa hasta 1 m en los instantes de transición, recuperándose rápidamente.

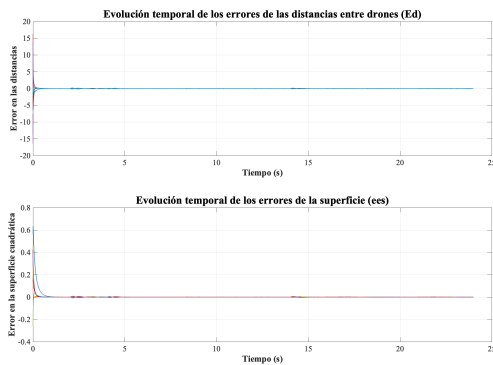


FIGURA 11: Errores de distancias entre drones y de separación con la superficie del escudo, con filtro de Kalman y consenso distribuido.

La Tabla 1 resume ambos escenarios. En el escenario 1, los errores de distancia convergen a cero en régimen permanente, mientras que en el escenario 2 presentan una banda de  $\pm 0.1$  m (2% de  $R_s$ ) debida al ruido de estimación. El error de orientación medio se incrementa de  $0.0335^\circ$  a  $0.135^\circ$ , equivalente a una desviación lateral de 0.05 m a la distancia de la cúpula defensiva ( $R_c = 21.67$  m). El error RMS de posición del filtro de Kalman es de 0.069 m para un móvil que se desplaza a velocidades de 7–15 m/s. El tiempo de convergencia de los errores de distancia se mantiene inferior a 2 s en ambos casos. Estos resultados confirman que el coste de operar con sensores ruidosos y consenso distribuido es limitado. Cabe señalar que las velocidades de control obtenidas en régimen permanente son compatibles con las prestaciones de drones multirrotor comerciales (10–20 m/s), ya que están acotadas por las velocidades del dron hostil y del objetivo. Los picos de velocidad se producen únicamente durante el transitorio inicial (inferior a 2 s).

| Métrica                    | Escenario 1    | Escenario 2   |
|----------------------------|----------------|---------------|
| Error orientación medio    | $0.0335^\circ$ | $0.135^\circ$ |
| Error distancia reg. perm. | $\approx 0$    | $\pm 0.1$ m   |
| Convergencia errores       | $< 2$ s        | $< 2$ s       |
| RMS posición Kalman        | N/A            | 0.069 m       |

TABLA 1: Comparación de errores entre escenarios 1 y 2.

## 6. Conclusiones

Se ha presentado un marco unificado para el control distribuido de un escudo defensivo de drones con dinámica de integrador simple, combinando una ley de control de formación basada en el gradiente de una función de potencial

—con términos repulsivos y de corrección de orientación— con un módulo de denegación de acceso que interpone el escudo entre el objetivo móvil y el enjambre hostil mediante las expresiones de velocidad lineal y angular derivadas en las Propositiones 1 y 2.

Las simulaciones validan el enfoque en cuatro escenarios, obteniéndose errores de formación del orden de  $10^{-2}$  m y de orientación inferiores a  $0.1^\circ$  en el caso ideal, y hasta  $0.135^\circ$  con sensores ruidosos. La incorporación de un filtro de Kalman de 18 estados con consenso distribuido permite operar con sensores ruidosos con un coste limitado: el error de orientación medio pasa de  $0.0335^\circ$  a  $0.135^\circ$  y los errores de distancia se mantienen por debajo del 2% del radio del escudo. Asimismo, se ha demostrado la capacidad de reconfigurar dinámicamente el radio, identificándose que la modificación anisotrópica del factor de escala no preserva la simetría de la superficie.

Como trabajos futuros se plantean: la extensión al doble integrador mediante *backstepping*, utilizando la ley de formación como lazo externo de referencia de velocidad; la incorporación de saturación en la señal de control preservando la dirección del gradiente; la adición de un término integral con anti-windup en la función de potencial para reducir los errores residuales con sensores ruidosos; la validación experimental con drones reales; resolver el problema de escalado anisotrópico del radio; y la extensión a estrategias de interceptación activa.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la Agencia Estatal de Investigación (AEI), proyecto PID2024-156427OB-I00.

## Referencias

- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrani, S., Al-Ammar, M. A. & Al-Khalifa, H. S., 2016. Ultrawideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors*, 16(5), 707. DOI: 10.3390/s16050707
- Anderson, B. D., Yu, C., Fidan, B. & Hendrickx, J. M., 2008. Rigid graph control architectures for autonomous formations. *IEEE Control Systems Magazine*, 28(6), pp. 48–63. DOI: 10.1109/MCS.2008.929280
- Eren, T., Belhumeur, P. N., Anderson, B. D. & Morse, A. S., 2002. A framework for maintaining formations based on rigidity. *IFAC Proceedings Volumes* 35(1), 499–504. DOI: 10.3182/20020721-6-es-1901.01308
- ETID – 2020. Secretaría de Estado de Defensa, 2020. Estrategia de tecnología e innovación para la defensa.
- Guinaldo, M., Sánchez-Moreno, J., Zaragoza, S. & Mañas-Álvarez, F.J., 2024. Distributed multi-UAV shield formation based on virtual surface constraints. *Robotics and Autonomous Systems*, 176(104684). DOI: 10.1016/j.robot.2024.104684
- Hua, Y., Yu, J. & Sun, C., 2024. Distributed Control, Optimization, and Game of UAV Swarm Systems. *Drones*, 8 (Editorial) Special Issue.
- Oh, K.-K., Park, M.-C. & Ahn, H.-S., 2015. A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 53, pp. 424–440. DOI: 10.1016/j.automatica.2014.10.022
- Olfati-Saber, R., Fax, J. A. & Murray, R. M., 2007. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, 95(1), pp. 215–233. DOI: 10.1109/JPROC.2006.887293
- Queiroz, M. de, Cai, X. & Feemster, M., 2019. *Formation Control of Multi-Agent Systems: A Graph Rigidity Approach*. Wiley. DOI: 10.1002/9781118887455
- Ren, W. & Sorensen, N., 2008. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control. *Robotics and Autonomous Systems*, 56(4), pp. 324–333. DOI: 10.1016/J.ROBOT.2007.08.005
- Rodríguez-Canosa, G. R., Thomas, S., del Cerro, J., Barrientos, A. & MacDonald, B., 2012. A real-time method to detect and track moving objects (DATMO) from unmanned aerial vehicles (UAVs) using a single camera. *Remote Sensing*, 4(4), pp. 1090–1111. DOI: 10.3390/rs4041090
- Zaragoza-Noguera, S., Guinaldo, M. & Sánchez-Moreno, J., 2025. Protection of moving targets using a drone swarm. *Jornadas de Automática*, 46. DOI: 10.17979/ja-cea.2025.46.12181