

Diseño e implementación de un controlador para un sistema líder-seguidor Design and implementation of a controller for a leader-follower system

Roald A. Monroy-Rodríguez ^a, José S. Torrero-Gracia ^{a,*}, Rosalba Galván Guerra ^a, Juan E. Velázquez-Velázquez ^a

^aUnidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Hidalgo, 42162, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

Resumen

Este trabajo propone una estrategia de seguimiento entre un cuadricóptero y un vehículo terrestre. Dicha estrategia integra técnicas de visión por computadora, programación, técnicas de linealización exacta, controladores PID, adaptados para operar en un dron comercial. Destacando la configuración de sistemas multiagentes, la estrategia de seguimiento se basa en un arreglo líder-seguidor con agentes heterogéneos; el líder es terrestre y el seguidor es aéreo. El diseño de la estrategia considera que el seguidor realiza la ejecución del algoritmo de seguimiento de manera autónoma, sin asistencia de cómputo externa (sistema embebido), y que no existe un intercambio bilateral de información. A pesar de la comunicación unilateral entre el cuadricóptero y el vehículo terrestre, la combinación de técnicas y controladores aplicados permite al dron realizar la tarea de seguimiento, utilizando la menor cantidad de recursos posible. Esto demuestra cómo la integración de disciplinas diversas puede resolver desafíos específicos en el campo de los sistemas autónomos, robóticos y mecatrónicos.

Palabras Clave: Control, Estrategia de seguimiento, Multiagentes, Líder-seguidor, Visión por computadora.

Abstract

This work proposes a tracking strategy between a quadcopter and a terrestrial vehicle. This strategy integrates computer vision techniques, programming, exact linearization techniques, and PID controllers, adapted to operate on a commercial drone. Highlighting the configuration of multi-agent systems, the tracking strategy is based on a leader-follower arrangement with heterogeneous agents; the leader is terrestrial, and the follower is aerial. The strategy's design considers that the follower executes the tracking algorithm autonomously, without external computational assistance (embedded system), and there is no bilateral information exchange. Despite the unilateral communication between the quadcopter and the terrestrial vehicle, the combination of applied techniques and controllers allows the drone to perform the tracking task, using the least amount of resources possible. This demonstrates how the integration of diverse disciplines can solve specific challenges in the field of autonomous, robotic, and mechatronic systems.

Keywords: Control, Tracking strategy, Multi-agent, Leader-follower, Computer vision.

1. Introducción

La presente investigación se enfoca en el estudio y desarrollo de controladores para cuadricópteros, específicamente para arreglos tipo líder-seguidor en situaciones de monitoreo aéreo; en la última década la tendencia de los vehículos autónomos ha crecido exponencialmente, las estrategias de control para la configuración líder-seguidor son variadas, autores como: Zhao y Go (2014) y Méndez (2015), han conseguido implementar controladores para este tipo de sistemas utilizando diferentes aproximaciones.

El cuadricóptero es un vehículo aéreo no tripulado de des-

pegue y aterrizaje vertical que consiste en 4 rotores dispuestos de forma que se cancelan las fuerzas de reacción de cada hélice lo cual elimina la necesidad de un rotor de cola. El diseño de controladores para los cuadricópteros resulta sencillo a comparación con otros vehículos aéreos, esto gracias a la simetría en el cuerpo del cuadricóptero lo que permite que pueda ser controlado a través de la modulación de la velocidad de las hélices (P. Castillo, 2005). Las naves tipo cuadricóptero son eficientes y su factor de forma pequeño presenta numerosas ventajas mecánicas, por ejemplo, tener cuatro hélices pequeñas reduce el par torsional lo que permite operar con velocidades más altas sin preocuparse por las vibraciones mecánicas, también es ca-

*Autor para correspondencia: jtorrerog1600@alumno.ipn.mx

Correo electrónico: rmonroyr1900@alumno.ipn.mx (Roald Aarón Monroy Rodríguez), jtorrerog1600@alumno.ipn.mx (José Sebastian Torrero Gracia), rgalvang@ipn.mx (Rosalba Galván Guerra), jvelazquezv@ipn.mx (Juan Eduardo Velázquez Velázquez).

Historial del manuscrito: recibido el 30/06/2024, última versión-revisada recibida el 26/8/2024, aceptado el 22/08/2024, publicado el 30/11/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13343>



paz de ejecutar una variedad de maniobras de vuelo en lugares de espacio reducido y de difícil acceso.

En años recientes, la coordinación de sistemas multiagentes ha recibido la atención de la comunidad científica. Las facilidades que ofrecen los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) los ha llevado a ser objeto de estudio para investigaciones en el campo de sistemas multiagentes. Los VANTs tienen amplias aplicaciones en operaciones de cooperación, búsqueda y rescate, así como en la optimización distribuida de sistemas robóticos móviles.

En la literatura se pueden encontrar distintos trabajos que desarrollan la problemática líder-seguidor para sistemas multiagentes. En (Li *et al.*, 2009) se analiza el consenso líder-seguidor considerando una topología de comunicación fija y propone un protocolo de consenso tipo observador que resuelve la problemática líder-seguidor. En (Rashid *et al.*, 2019) se estudia controladores para la configuración líder-seguidor para sistemas robóticos con el objetivo de profundizar en las tendencias de los sistemas robóticos de tipo enjambre.

En (Madhevan y Sreekumar, 2013) se aplica un controlador para la formación de sistemas robóticos terrestres tipo líder-seguidor, donde uno de los robots actúa como líder y cuyos movimientos definen la trayectoria para el resto de los agentes. Los seguidores se sitúan según la posición y orientación del líder.

De forma similar, en (Alfaro, 2020) se desarrollan controladores para la configuración líder-seguidor de vehículos terrestres, donde los seguidores no solo mantienen la misma trayectoria del líder, sino que también se trasladan siguiendo una formación específica, como en línea recta o en punta de flecha, validando su funcionamiento mediante simulaciones.

En el trabajo de (Mejía, 2022) se propone un control adaptable para arreglos multiagentes, con la peculiaridad de mezclar agentes terrestres y aéreos, volviendo al sistema de tipo heterogéneo, similar al que se desea realizar en este trabajo. Para validar los controladores utiliza una simulación que incluye los modelos matemáticos de los agentes recorriendo diferentes trayectorias.

Por otro lado, los trabajos (Wu *et al.*, 2021) y (Avila, 2019), se especializan en el control de formaciones de vehículos aéreos no tripulados tipo cuadricóptero, además de que conjugan estrategias similares de solución a las que se proponen en los trabajos antes mencionados. En (Zhao y Go, 2014) se utiliza un cuadricóptero como agente seguidor por su relativa facilidad para esquivar obstáculos que en conjunto con estrategias de control le permitan realizar dicha tarea de seguimiento.

Los trabajos mencionados dan la pauta de que esta área de investigación en un futuro tendrá una amplia gama de aplicaciones dentro de la vida cotidiana, así como en la industria en tareas de automatización. Sin embargo, dentro de las tareas de seguimiento como la vigilancia, es poco común encontrar un arreglo de multiagentes tipo líder-seguidor que se integre por agentes que tengan distintas restricciones de movimiento como es el caso de un vehículo terrestre y uno aéreo. También es importante destacar que estos trabajos utilizan algún tipo de sistema de cómputo auxiliar, independiente de los agentes, para realizar todas las operaciones lógicas y matemáticas. Sin embargo, en el presente artículo, esto no es posible debido a las restricciones en los recursos disponibles. Por ello, se requieren adecuaciones que permitan resolver el problema bajo estas li-

mitantes.

A lo largo de este trabajo se utiliza una notación que simplifica la escritura de las funciones trigonométricas $\sin x$, $\cos x$ y $\tan x$ como S_x , C_x y T_x respectivamente.

2. Estrategia de seguimiento

La estrategia de seguimiento en el sistema consiste en que el agente seguidor, en este caso un Mambo Parrot Minidrone, determine su posición relativa con respecto al agente líder, un vehículo terrestre, esto mediante la información que pueda ser captada por medio de la cámara integrada del seguidor que se encuentra orientada hacia abajo. Para obtener detalles acerca del cuadricóptero, diríjase al Apéndice A.

Luego, usando técnicas de control automático y basándose en los errores de posición y orientación detectados, el agente seguidor ajusta su posición para mantenerse en una ubicación específica respecto al líder.

La posición relativa se obtiene utilizando técnicas de visión asistida por computadora que analizan las imágenes adquiridas por la cámara integrada en el seguidor. El agente líder porta dos balizas de identificación que permiten distinguir no solo la ubicación del líder, sino también su orientación. Estas balizas, de geometría esférica y colores magenta y verde, se colocan en la parte delantera y trasera del vehículo terrestre. Se considera que el punto medio entre ambas balizas coincide con el centroide del agente líder, y su orientación se determina a través del ángulo formado entre las dos balizas.

La Figura 1 muestra la disposición de las balizas y las referencias utilizadas para obtener el error de posición y orientación. El marco de referencia del diagrama coincide con el del agente seguidor.

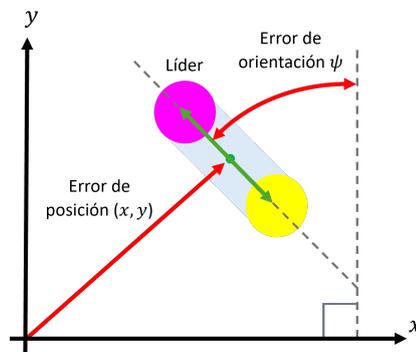


Figura 1: Diagrama del error de posición y orientación.

Esta estrategia se implementa y funciona bajo las siguientes condiciones:

- Todo el procesamiento necesario para realizar la tarea de seguimiento se realiza en la plataforma del agente seguidor, en este caso, el cuadricóptero.
- El agente seguidor desconoce las condiciones del líder a excepción de lo que pueda determinar al observarlo con su cámara.
- La velocidad del líder se encuentra acotada a la velocidad de respuesta del dron y a las restricciones física del sistema.

- Se asume que el espacio aéreo en el cual se desenvuelve el cuadricóptero está libre de obstáculos.
- El desempeño del sistema está limitado a las capacidades computacionales que ofrece el cuadricóptero y las herramientas compatibles con el mismo.

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo de las etapas del sistema para llevar a cabo la tarea de seguimiento.

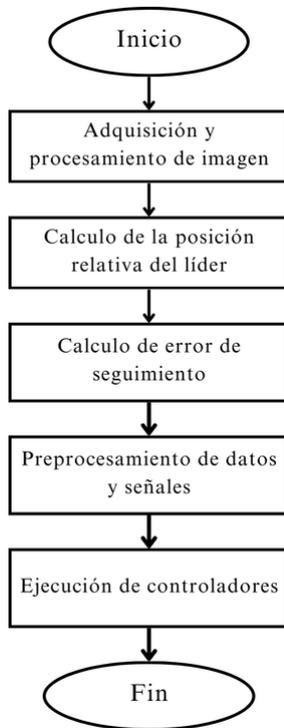


Figura 2: Diagrama de flujo de la es etapas del sistema.

El funcionamiento correcto de la estrategia de seguimiento depende significativamente de que el seguidor sea capaz de ubicar al líder, lo que implica que el líder debe mantenerse en el campo de visión de la cámara. La velocidad del líder y la frecuencia de procesamiento de la plataforma del agente seguidor también juegan un papel importante para cumplir con este requisito. Para el tema del presente trabajo, se asume que los resultados de la ubicación del líder son siempre apropiados.

3. Algoritmo de procesamiento de imágenes

El algoritmo de procesamiento de imágenes se encarga de identificar la posición relativa del líder respecto al seguidor. Para lograrlo, procesa la imagen proveniente de la cámara integrada con el propósito de ubicar los centroides de las balizas. A partir de estas coordenadas, se aplican técnicas matemáticas para determinar la posición y orientación del líder. Con inspiración en P. Castillo (2005), se diseña un proceso que consta de seis etapas principales, que son las siguientes:

1. **Adquisición de imagen:** Durante esta etapa se reciben las señales de la cámara y se operan para obtener una imagen en el espacio de color RGB.

2. **Segmentación de imagen:** Se aplica una segmentación de color por umbral y como resultado se obtiene una imagen binaria que contiene los píxeles que representan a las balizas.

3. **Preprocesamiento:** En esta etapa se realizan operaciones para mejorar la calidad de imagen y facilitar el análisis, incluyendo filtros, reducción de ruido y operaciones morfológicas.

4. **Ubicación de centroides:** Se utilizan algoritmos para determinar las coordenadas de los centroides de las balizas a partir de las regiones de píxeles que las representan. Estas coordenadas se expresan en relación al marco de referencia de la imagen.

5. **Transformación de coordenadas:** Durante esta etapa, se transforman las coordenadas de los centroides del marco de referencia de la imagen al sistema de coordenadas del agente líder.

6. **Módulo de comportamiento activo:** Esta etapa interpreta los datos obtenidos y adapta el comportamiento del sistema según la situación en la que se encuentre.

La Figura 3 muestra una fotografía tomada con la cámara integrada del agente seguidor, en dicha imagen se observa al líder junto con las dos balizas en un ambiente de iluminación uniforme, este es un ejemplo de lo que captaría el dron durante la operación de seguimiento.



Figura 3: Imagen capturada con la cámara integrada del cuadricóptero.

Al aplicar el algoritmo de procesamiento de imágenes a la Figura 3 se obtiene como resultado la Figura 4, en ella se puede distinguir dos regiones de píxeles que representan a las balizas y se observan dos puntos que coinciden con los centroides ubicados.

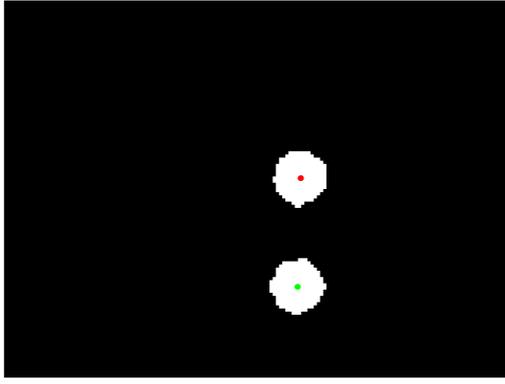


Figura 4: El resultado final del procesamiento de imágenes muestra los centroides ubicados, resaltados por un punto del color respectivo de cada baliza.

El resultado final del algoritmo de procesamiento de imágenes se almacena en un bus de datos que se envía a la etapa intermedia del sistema. Cabe mencionar que, debido a las características del agente seguidor, el apartado que alberga el algoritmo de procesamiento de imágenes en su programación está limitado a ejecutarse cada 200 ms. Este tiempo no incluye la ejecución del propio algoritmo, por lo que es posible que la frecuencia de operación del módulo de visión se vea ralentizada.

4. Etapa intermedia en el flujo de datos

La etapa intermedia es un componente crucial en la arquitectura del sistema del dron, que actúa como un enlace entre los módulos de visión y control. Su propósito principal es gestionar la diferencia en las frecuencias de operación y realizar los ajustes necesarios para que las señales de salida del módulo de visión sean adecuadamente interpretadas y utilizadas por el módulo de control.

El objetivo de la etapa intermedia es recibir los datos del algoritmo de visión, interpretarlos y modificarlos si es necesario, para luego enviarlos al módulo de control. Esta etapa no solo unifica la visión y el control del dron, sino que también ofrece oportunidades para el desarrollo del algoritmo. Modularizar el sistema proporciona una mayor maniobrabilidad para el control específico de señales, la detección de errores y la mejora individual de cada componente.

El intermediario se diseña siguiendo la arquitectura de una máquina de estados finitos. Los estados del sistema tendrán acceso al bus de referencias, lo que les permite realizar modificaciones antes de enviar las órdenes a la etapa de control. Los estados se activan mediante banderas asociadas a ciertos parámetros del sistema. A continuación, se describen brevemente cada uno de los estados.

- **Despegue:** Implica la inicialización de los buses de comunicación entre las etapas, así como la ejecución de maniobras necesarias para iniciar el vuelo del dron.
- **Vuelo sostenido:** Este estado se activa al estabilizarse el dron a la altura deseada, manteniéndola constante y ciclando el bus de referencias en la etapa de control. Además, el sistema monitorea continuamente el teclado y el bus de visión para cambiar al estado adecuado

- **Seguimiento del líder:** Se activa cuando la etapa de visión detecta nuevas coordenadas del líder. El bus de referencias se ajusta en consecuencia y se envía al estado de vuelo sostenido para mantenerlo ciclado en la etapa de control.
- **Ajuste mediante teclado:** Este estado se activa al detectar la entrada de un carácter desde el teclado. Dependiendo de la letra presionada, se realiza un cambio en el bus de referencias, luego, se envía al estado de vuelo sostenido para mantenerlo ciclado en la etapa de control.
- **Finalizado:** Se activa mediante el botón de paro o al alcanzar terminarse el tiempo límite de pruebas, al accionarse se desactivan los motores y finaliza el programa.

5. Control del cuadricóptero seguidor

5.1. Modelo dinámico del cuadricóptero

Considere que el cuadricóptero se mueve en un ambiente libre de perturbaciones y que todos los parámetros del sistema son conocidos. Es así que el modelo dinámico del cuadricóptero (Alaiwi y Mutlu, 2018) está dado por:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}(C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\theta)u_1, \quad (1)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m}(S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\theta)u_1, \quad (2)$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{m}(C_\theta C_\phi)u_1 - g, \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{u_2}{I_{xx}}, \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{u_3}{I_{yy}}, \quad (5)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{u_4}{I_{zz}}, \quad (6)$$

dichas ecuaciones describen las relaciones que existen entre los distintos parámetros físicos (masa m e inercias rotacionales I_{xx} , I_{yy} y I_{zz}), las entradas de control (u_1 , u_2 , u_3 y u_4) y los movimientos de traslación y rotación (x , y , z , ϕ , θ y ψ) del cuadricóptero (Figura 5).

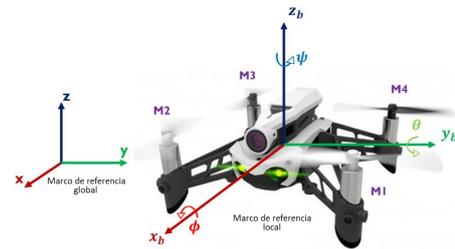


Figura 5: Marco de referencia inercial y del cuadricóptero.

A fin de facilitar el análisis de los subsistemas x , y y z se emplea una técnica de linealización exacta (Khalil, 2002) en la entrada de control u_1 de la siguiente manera:

$$u_1 = \frac{m}{C_\theta C_\phi}(U_1 + g), \quad (7)$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{m}(C_\theta C_\phi)u_1 - g = U_1, \quad (8)$$

$$\ddot{x} \approx \frac{1}{m}(S_\theta C_\phi)u_1 = \frac{S_\theta}{C_\theta C_\phi}(U_1 + g) \approx T_\theta(U_1 + g), \quad (9)$$

$$\ddot{y} \approx -\frac{1}{m}(S_\phi)u_1 = -\frac{S_\phi}{C_\theta C_\phi}(U_1 + g) \approx -T_\phi(U_1 + g), \quad (10)$$

donde U_1 se considera la nueva entrada de control. Además, al suponer que se aplica una rotación equivalente al efecto que produce ψ por medio de código en el cuadricóptero y que los ángulos ϕ y θ no tienen efectos sobre los subsistemas x y y respectivamente se llega a las ecuaciones (8) a (10).

Dadas las ecuaciones resultantes al aplicar la linealización exacta se propone utilizar controladores por retroalimentación de estados para los subsistemas z y ψ ya que conforman un sistema lineal, mientras que los subsistemas x y y presentan no linealidades que dificultan su análisis. Sin embargo, tanto los subsistemas x y y como ϕ y θ son sistemas que presentan un doble integrador en su función de transferencia, categorizándolos como sistemas de tipo 2 (Ogata, 2001), lo que los dota de una capacidad adicional de lidiar con perturbaciones que puedan afectar tanto la posición como la velocidad del sistema. Por lo anterior se considera apropiado el diseño de un control de velocidad para ambos subsistemas.

Comentario 1. Es importante aclarar que en la práctica, por mínimas que sean, existirá la presencia de incertidumbres y perturbaciones que la linealización exacta no podrá eliminar en su totalidad, lo que resulta en dinámicas no lineales que, si bien, pueden ser mitigadas de mejor manera utilizando estrategias de control no lineal robusto como modos deslizantes, este cambio afectaría el peso computacional del algoritmo.

5.2. Estrategia de control

Dado que se utiliza la técnica de retroalimentación de estados (Nise, 2015) para x y ψ , la forma que adquieren las entradas de control U_1 y u_2 es

$$U_1 = -K_{z_1}(z - r_z) - K_{z_2}\dot{z}, \quad (11)$$

$$u_2 = -K_{\psi_1}(\psi - r_\psi) - K_{\psi_2}\dot{\psi}. \quad (12)$$

donde r_z y r_ψ son las señales de referencia para estos subsistemas. Con lo anterior se pueden determinar los polinomios característicos

$$P_{Cz} = s^2 + K_{z_2}s + K_{z_1}, \quad (13)$$

$$P_{C\psi} = s^2 + \frac{K_{\psi_2}}{I_{zz}}s + \frac{K_{\psi_1}}{I_{zz}}. \quad (14)$$

Se propone un comportamiento sobreamortiguado como respuesta al escalón unitario para estos subsistemas. Esta condición la cumple un sistema de segundo orden con un polinomio deseado $P_d = s^2 + 3.15s + 2.48$, cuya respuesta al escalón se muestra en la Figura 6. Esto permite determinar los valores de las constantes de retroalimentación presentes en (13) y (14).

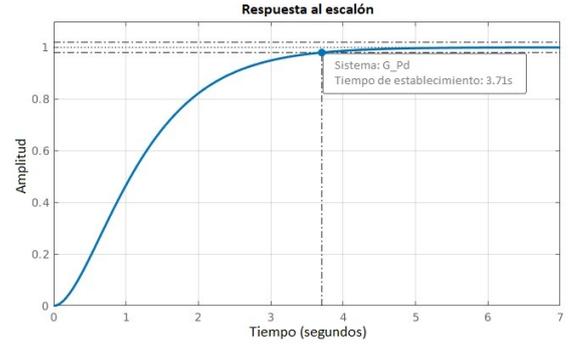


Figura 6: Respuesta de un sistema con $P_C = s^2 + 3.15s + 2.48$ a un escalón unitario.

Para el diseño de los controladores x , y , ϕ y θ se toma en consideración lo mencionado en la subsección anterior y se diseñan dos controles de velocidad que tienen como entrada de referencia un valor proporcional al error de posición. Esto resulta en una secuencia de controladores en cascada como se muestra en la Figura 7. El primer controlador encargado de la posición angular se diseña utilizando la herramienta **Control System Designer** de MATLAB. Con ello se obtienen las constantes $K_{P\theta} = 4$ y $K_{P\dot{\theta}} = 0.003$, $K_{I\dot{\theta}} = 0.006$, $K_{D\dot{\theta}} = 0.00012$ de los controladores P y PID respectivamente. La respuesta del sistema al escalón se muestra en la Figura 8.

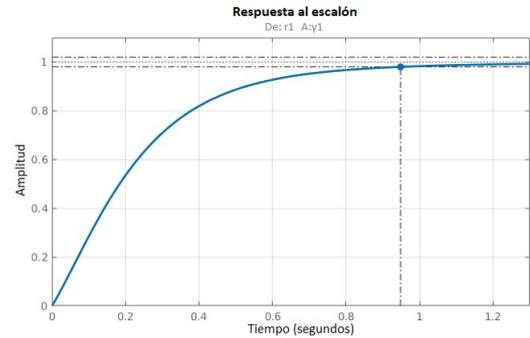


Figura 8: Respuesta al escalón unitario del controlador de posición angular ($T_s \approx 0.95s$).

Con el fin de determinar las constantes restantes de los controladores P y PI mostrados en la Figura 7 se plantean relaciones proporcionales entre el error de posición y la velocidad deseada, así como el error de posición y la referencia de posición angular. Específicamente se propone que la referencia de velocidad sea el 70% error de posición y que un error de posición de $1m$ implique una referencia en posición angular de $0.14rad$. Bajo dichas relaciones se encuentran las constantes $K_{Px} = 0.7$, $K_{P\dot{x}} = 0.2$ y se agrega una constante integral $K_{I\dot{x}} = 0.1$ en el lazo de velocidad para mitigar cualquier perturbación que pueda afectar al sistema como ráfagas de viento y efectos no considerados al reducir de complejidad las ecuaciones (1) y (2).

Para complementar el diseño de estos controladores, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad (Paraskevopoulos, 2017) para los grados de libertad x , y y z . Los resultados $S_{x,y:T}$, $S_{z:K_{z_1},K_{z_2}}$ se muestran en las Figuras 9 y 10, respectivamente.

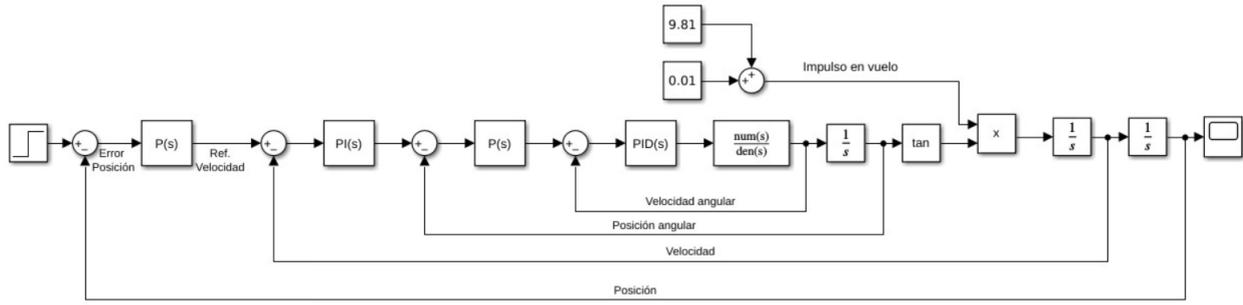


Figura 7: Diagrama de bloques de los controladores x y y

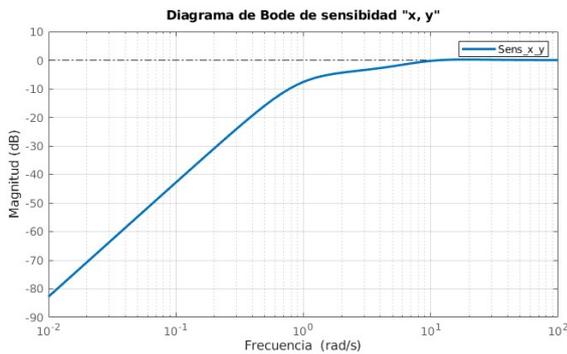


Figura 9: Diagrama de Bode de sensibilidad en x y y respecto al impulso en vuelo $T = (U_1 + g)$.

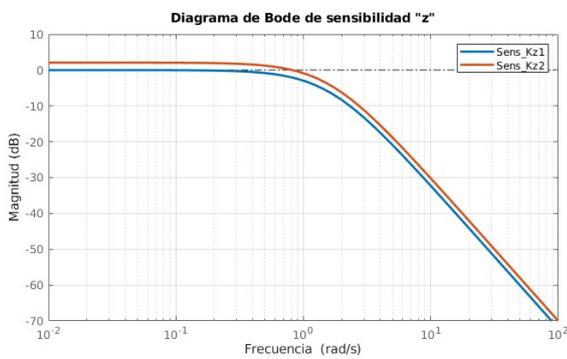


Figura 10: Diagrama de Bode de sensibilidad en z respecto a variaciones en medición de posición (azul) y velocidad (naranja).

Los diagramas anteriores muestran que perturbaciones con frecuencias menores a 0.1Hz en las mediciones de posición y velocidad en z tienen un efecto notable en la salida del subsistema. Para el caso de los subsistemas x y y , el parámetro de operación de interés es el impulso en vuelo que surge del comportamiento del subsistema z . La Figura 9 indica que si este parámetro varía a una frecuencia mayor o igual a 1.6Hz su efecto es altamente notable en la salida de este subsistema.

Comentario 2. Cabe destacar que los controladores PI y PID son capaces de contrarrestar perturbaciones o incertidumbres constantes o cuya forma se asemeje a un escalón en el sistema. Dadas las condiciones del espacio de pruebas y que existen

ciertos parámetros cuyo valor exacto es desconocido pero claramente constante (como la masa m y las inercias rotacionales I_{xx} , I_{yy} y I_{zz}) se considera que estas incertidumbres perimétricas son contrarrestadas de manera efectiva por dichos controladores.

6. Resultados de simulación

Con el procedimiento desarrollado anteriormente y las ecuaciones (1) a (6), se realiza una simulación de los cuatro controladores en Simulink con el fin de observar su comportamiento y verificar su funcionamiento antes de ser aplicados en el cuadricóptero. El resultado de dicha simulación se muestra en las Figuras 11 a 14.

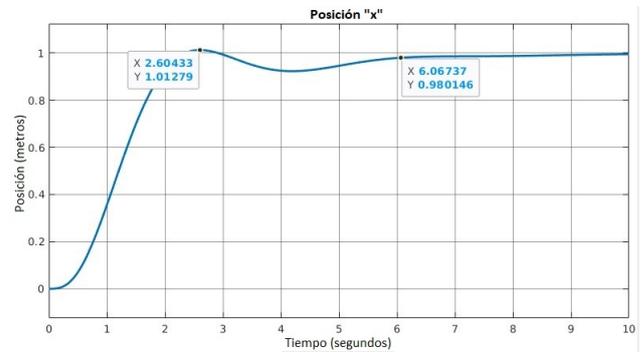


Figura 11: Simulación de respuesta al escalón unitario del controlador de posición x ($T_s \approx 6\text{s}$, $T_p \approx 2.6\text{s}$).

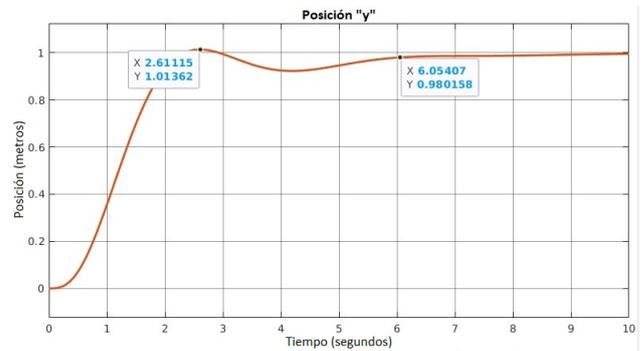


Figura 12: Simulación de respuesta al escalón unitario del controlador de posición y ($T_s \approx 6\text{s}$, $T_p \approx 2.6\text{s}$).

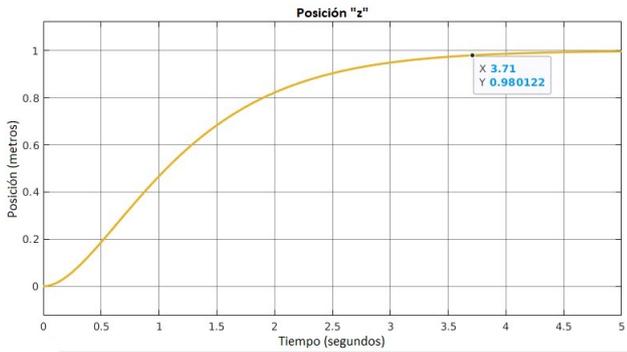


Figura 13: Simulación de respuesta al escalón del controlador de posición z ($T_s \approx 3.7s$).

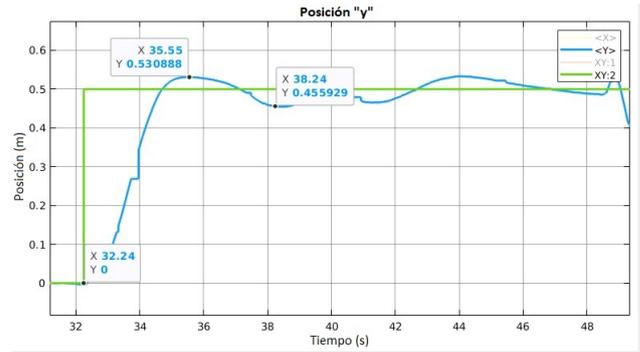


Figura 16: Respuesta del subsistema y (azul) y señal de referencia (verde) con $T_p \approx 3.3s$.

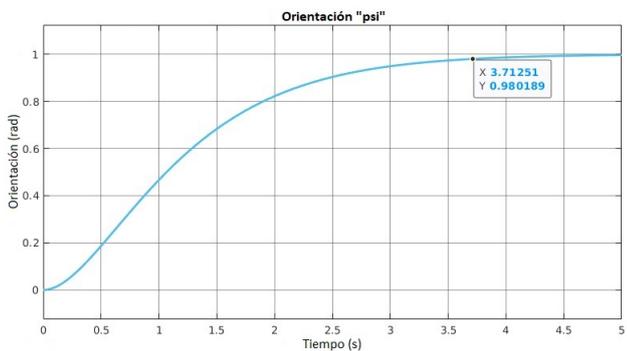


Figura 14: Simulación de respuesta al escalón unitario del controlador de orientación ψ ($T_s \approx 3.7s$).

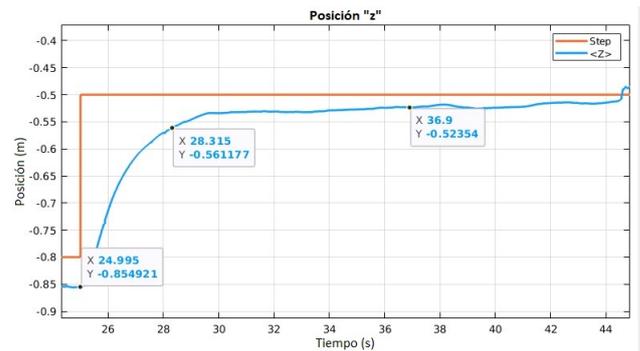


Figura 17: Respuesta del subsistema z (azul) y señal de referencia (naranja) con $T_s \approx 3.32s$.

Con esta información se corrobora que la respuesta esperada de los controladores es adecuada para cumplir con la tarea de seguimiento.

7. Resultados experimentales

7.1. Validación de controladores

Para validar el funcionamiento de los controladores en el cuadricóptero se utilizan señales de referencia tipo escalón y se comparan los datos resultantes con las gráficas obtenidas en la simulación. En cada subsistema se utilizan referencias distintas y se analiza el comportamiento obtenido en las Figuras 15 a 18.

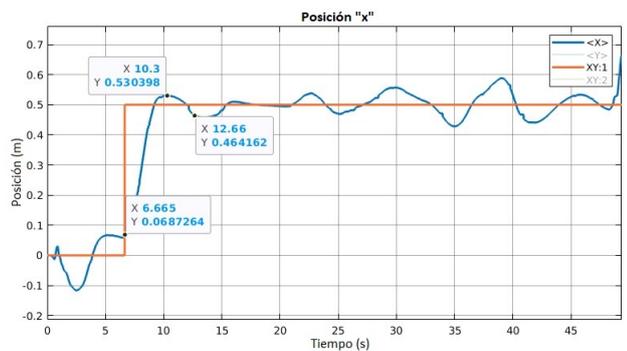


Figura 15: Respuesta del subsistema x (azul) y señal de referencia (naranja) con $T_p \approx 3.63s$.

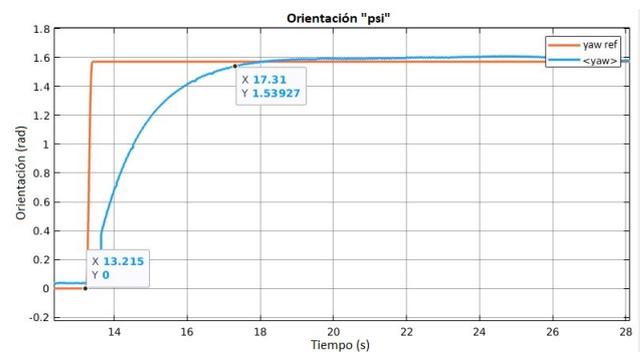


Figura 18: Respuesta del subsistema ψ (azul) y señal de referencia (naranja) con $T_s \approx 4.095s$.

Con la información de las gráficas se aprecia que los controladores z y ψ tienen el tipo de respuesta esperada y los tiempos de establecimiento se aproximan a los esperados. Por otro lado, el comportamiento observado en x y y , si bien los tiempos pico se aproximan a los esperados y logran mantener al cuadricóptero sobre la referencia indicada, presentan oscilaciones de una amplitud reducida pero que puede llegar a afectar la tarea de seguimiento.

La retroalimentación de los distintos estados en el seguidor se obtiene mediante técnicas de odometría, junto con las señales provenientes de la unidad de medición inercial (IMU) incorporada en dicho agente. El marco de referencia para las mediciones de los estados coincide con el punto de despegue, que representa el marco de referencia global del sistema. Depend

de estos métodos implica que la señal de retroalimentación contenga un error acumulativo que incrementa con el tiempo. Para disminuir el impacto de este fenómeno, se realiza un proceso de calibración de sensores antes del despegue.

7.2. Prueba de seguimiento

Para comprobar el correcto funcionamiento de los controladores, se realizaron pruebas de seguimiento en un espacio controlado de 4 m², sin obstáculos. El agente líder se controla de forma manual asegurándose de no exceder una velocidad máxima de 20 cm/s, siguiendo trayectorias planeadas con antelación y diseñadas para cubrir una gran variedad de movimientos del agente seguidor. La Figura 19 muestra el arreglo del agente líder y seguidor durante las pruebas, junto con el vector de error \vec{e} , y el error en orientación e_ψ .

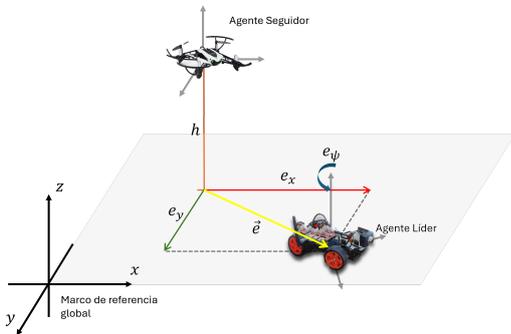


Figura 19: Esquemático del agente líder y seguidor en las pruebas de seguimiento.

Tras realizar distintas pruebas de seguimiento se obtienen las Figuras 20 a 23, donde se puede apreciar el comportamiento del cuadricóptero ante los cambios de referencia que se generan gracias a los algoritmos de visión asistida por computadora que procesan las imágenes obtenidas por la cámara integrada. En la Figura 20, se puede observar el resultado obtenido en la altura de vuelo de una prueba de seguimiento que es consistente con el comportamiento mostrado en la Figura 17 y que en conjunto con el resultado del sistema de orientación ψ (Figura 21) son los subsistemas que se comportan de manera más cercana al tipo de respuesta para el que fueron diseñados.

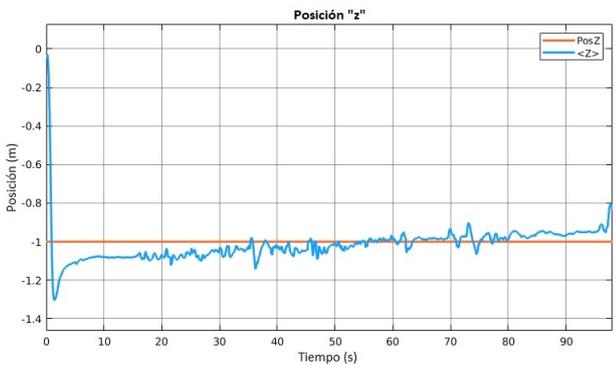


Figura 20: Resultado del controlador de altura (azul) z en prueba de seguimiento y señal de referencia (naranja).

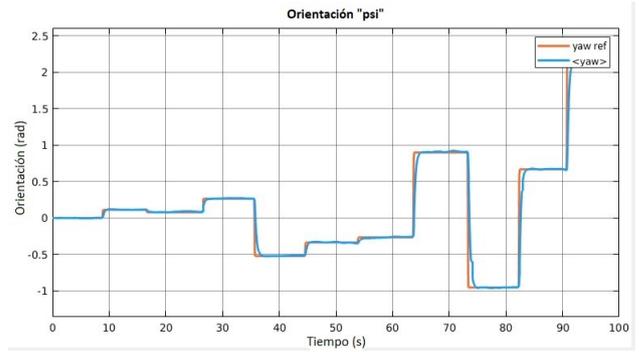


Figura 21: Resultado del controlador de orientación (azul) ψ en prueba de seguimiento junto con señal de referencia (naranja).

En lo que respecta a los controladores de posición x y y , los sistemas responden de manera aceptable (Figuras 22 y 23) a pesar de que existe un comportamiento oscilatorio que mantiene una amplitud máxima de 20 cm, pero mayormente esta acotado por debajo de los 10 cm. Incluso con estas perturbaciones, es posible observar que ambos controladores mantienen al cuadricóptero sobre la referencia que determinan los algoritmos de visión aun cuando no sea con la precisión esperada.

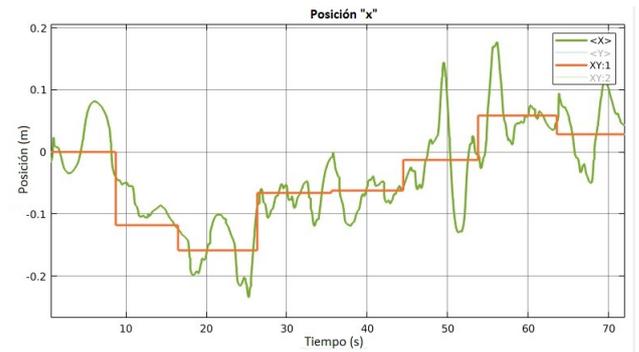


Figura 22: Resultado del controlador de posición x (verde) en prueba de seguimiento junto con la señal de referencia (naranja)

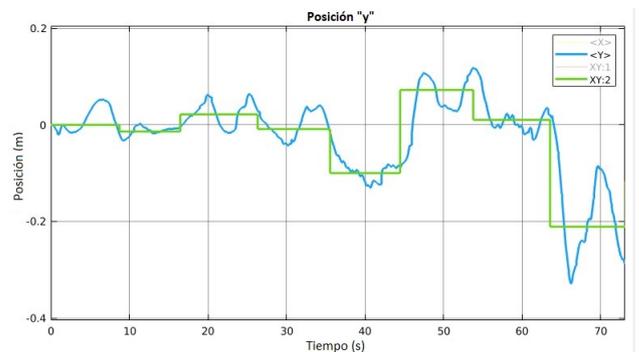


Figura 23: Resultado del controlador de posición (azul) y en prueba de seguimiento y señal de referencia (verde).

Conclusiones

Este trabajo demuestra la versatilidad de los cuadricópteros para distintas tareas, enfocándose en el monitoreo. Además, explora un enfoque en sistemas multiagentes donde el intercambio

de información es unidireccional, alejándose de la comunicación bidireccional tradicional entre los agentes del sistema.

Aun cuando el objetivo principal es el desarrollo de una estrategia de seguimiento, se puede rescatar la viabilidad de reducir de manera significativa el uso de recursos empleados en el sistema en comparación con las diversas aplicaciones que actualmente emplean el arreglo líder-seguidor en las que el manejo de recursos no se ve tan limitado. Lo anterior surge directamente de seleccionar características específicas del arreglo presentado en este trabajo, como son: Optar por ejecutar el algoritmo de seguimiento en el agente seguidor sin asistencia computacional externa, lo que en consecuencia involucra utilizar algoritmos que requieren un esfuerzo computacional bajo, la simplicidad de la lógica del algoritmo de seguimiento y el hecho de que la comunicación entre agentes es unidireccional y que depende enteramente del seguidor.

El Parrot Mambo Minidrone, aunque no especializado para este tipo de investigaciones, demostró ser capaz de realizar la tarea de seguimiento. Sin embargo, su limitada capacidad computacional, la falta de precisión de sus sensores y la restrictiva compatibilidad con los entornos de programación limitaron su desempeño. Estos inconvenientes, junto con la complejidad de las ecuaciones dinámicas, presentaron un reto en el diseño y aplicación de los controladores. Aunque el cuadricóptero pudo realizar exitosamente la tarea de seguimiento, el desempeño de los controladores se vio afectado por estas limitaciones.

Los puntos anteriores permitieron indagar cuáles pueden ser los resultados esperados al reducir la complejidad del sistema y como es que estos cambios afectan a su desempeño global. Esta información permite profundizar en el manejo de multiagentes en tareas coordinadas, estrategias de seguimiento y diseño de controladores para tareas especializadas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico de la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional SIP-IPN proyectos: 20241197 y 20242437.

Extendemos nuestro agradecimiento a todos aquellos que dedicaron generosamente su tiempo y brindaron su apoyo, especialmente en los momentos más desafiantes.

Referencias

- Alaiwi, Y. y Mutlu, A. (2018). Modelling, simulation and implementation of autonomous unmanned quadrotor. *Machines. Technologies. Materials.*, 12(8):320–325.
- Alfaro, P. (2020). Control de robots móviles autónomos en formación usando el esquema líder-seguidor. Tesis de máster, PUCP.
- Avila, J. (2019). Diseño e implementación de estrategias de consenso líder-seguidor para un sistema de multi-agentes. Tesis de máster, ICBI-BD-UAEH.
- Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear Systems*. Prentice Hall.

- Li, Z., Duan, Z., y Huang, L. (2009). Leader-follower consensus of multi-agent systems. En *2009 American Control Conference*, pp. 3256–3261.
- Madhevan, B. y Sreekumar, M. (2013). Tracking algorithm using leader-follower approach for multi robots. *Procedia Engineering*, 64:1426–1435. International Conference on Design and Manufacturing (IConDM2013).
- Mejía, R. (2022). Diseño y simulación de un control adaptable para una formación heterogénea de robots. Tesis de máster, EPN.
- Méndez, M. M. (2015). Control de vuelo en configuración líder-seguidor para aeronaves tipo cuadrirotor. Tesis de máster, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N.
- Nise, N. S. (2015). *Control Systems Engineering*. Wiley.
- Ogata, K. (2001). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall PTR, USA, 4th edición.
- P. Castillo, R. Lozano, A. E. D. (2005). *Modelling and control of mini flying machines*. Springer Science Business Media.
- Paraskevopoulos, P. N. (2017). *Modern Control Engineering*. CRC Press.
- Rashid, M., Yakub, F., Ali, M., Mamat, N., Putra, M., Roslan, A. H., Shah, H., y Mohd Aras, M. S. (2019). Comprehensive review on controller for leader-follower robotic system. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 48:985–1007.
- Wu, F., He, J., Zhou, G., Li, H., y Liu, Y. (2021). Performance of sliding mode and consensus-based control approaches for quadrotor leader-follower formation flight. En *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 1671–1676.
- Zhao, W. y Go, T. H. (2014). Quadcopter formation flight control combining mpc and robust feedback linearization. *Journal of the Franklin Institute*, 351(3):1335–1355.

Apéndice A. Mambo Parrot Minidrone

El cuadricóptero utilizado en este protocolo es el Parrot Mambo (Figura A.24), dirigido a entusiastas principiantes. Parrot ofrece un software para controlarlo, adecuado para la mayoría de los usuarios, pero limitado para quienes desean una manipulación más profunda. Por ello, el fabricante permite programarlo en plataformas como Tynker y Swift Playground. También es posible programarlo mediante Matlab, aunque para ello es necesario cambiar el firmware original.

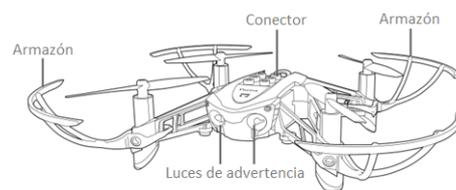


Figura A.24: Mambo Parrot Minidrone

El cuadricóptero cuenta con un acelerómetro y giroscopio de 3 ejes, tiene un sensor ultrasónico ubicado en la parte inferior y un sensor de presión en la parte superior, ambos se utilizan para determinar la altura de vuelo, su peso sin accesorios es de 63gr y utiliza una batería de 660 mAh que ofrece 8 minutos de vuelo continuo con accesorios conectados y 10 minutos sin accesorios.