

# **ESTIMACIÓN EN LÍNEA DE LA MASA DE UN VEHÍCULO AÉREO AUTÓNOMO**

## *ON-LINE ESTIMATION OF THE MASS OF AN AERIAL AUTONOMOUS VEHICLE*

***Daniel Galván Pérez***

Universidad Politécnica de Tulancingo, México  
*daniel.galvan2115007@upt.edu.mx*

***Hugo Yáñez Badillo***

Tecnológico Nacional de México / TES de Tianguistenco, México  
*hugo\_mecatronica@test.edu.mx*

***Francisco Beltrán Carbajal***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México  
*fbeltran@azc.uam.mx*

***Alejandro Álvarez Díaz***

Tecnológico Nacional de México / TES de Tianguistenco, México  
*alejandro\_201726090@test.edu.mx*

***Salvador Silvas Zotea***

Tecnológico Nacional de México / TES de Tianguistenco, México  
*salvador\_201726052@test.edu.mx*

***Iván de Jesús Rivas Cambero***

Universidad Politécnica de Tulancingo, México  
*ivan.rivas@upt.edu.mx*

***Marco Antonio Sánchez Romero***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México  
*al2163034144@azc.uam.mx*

**Recepción:** 28/noviembre/2022

**Aceptación:** 27/marzo/2023

## **Resumen**

El interés en los vehículos aéreos no tripulados ha incrementado notablemente durante los últimos años. El sistema de control de estos vehículos debe poseer la capacidad de compensar incertidumbres paramétricas, dinámicas no modeladas y perturbaciones externas, con el fin de que el vehículo pueda llevar a cabo tareas de regulación y seguimiento de trayectorias. En este artículo se presenta un esquema

de estimación en línea de la masa de un vehículo no tripulado de cuatro rotores mediante métodos algebraicos. Posteriormente, se introduce un esquema de control PD que considera la información de la masa estimada para mejorar su desempeño. Se plantean dos escenarios para validar el alcance del esquema propuesto, donde se observan niveles aceptables del error de seguimiento. Dicho esquema mejora el desempeño del sistema ante variaciones inesperadas de su masa, lo que beneficia la ejecución de tareas en aplicaciones como monitoreo y vigilancia.

**Palabras Clave:** Control de movimiento, estimación en línea de la masa, identificación algebraica, vehículo aéreo.

## **Abstract**

*Interest in unmanned aerial vehicles has increased markedly in recent years. The control system of these vehicles must have the ability to compensate parametric uncertainties, non-modelled dynamics and external disturbances, so that the vehicle can carry out regulation and trajectory tracking tasks. This paper presents an online estimation scheme for the mass of a four-rotor unmanned vehicle using algebraic methods. Subsequently, a PD control scheme is introduced that considers the information of the estimated mass to improve its performance. Two scenarios are proposed to validate the scope of the proposed scheme, where acceptable levels of tracking error are observed. The scheme improves the performance of the system in the face of unexpected variations in its mass, which benefits the execution of tasks in applications such as monitoring and surveillance.*

**Keywords:** *Aerial vehicle, algebraic identification, motion control, on-line mass estimation.*

## **1. Introducción**

Durante los últimos años se ha extendido el uso de vehículos aéreos, debido a la gran variedad de aplicaciones que abarcan en diferentes campos de investigación, tales como vigilancia, mapeo, monitoreo e inspección, filmación, procesamiento de imágenes, etc. A través del desarrollo tecnológico y la adaptación de estos vehículos se han dado soluciones y se ha facilitado el cumplimiento de estas actividades. Para

poder llevar a cabo tareas en este tipo de aplicaciones se requiere de movimientos precisos en interiores y exteriores a determinada velocidad y altura, los vehículos aéreos requieren de estrategias de estimación y control eficientes que les permitan llevar a cabo la planificación y ejecución de su movimiento de manera óptima, para este fin se han desarrollado diferentes trabajos que abordan estas problemáticas.

En [Trapiello, 2018] se aborda el problema de control de posición y guiñada de un cuadricóptero a través de una estructura de control en cascada, la cual está compuesta por un controlador de posición exterior que devuelve la fuerza de empuje necesaria y los ángulos de balanceo y cabeceo para alcanzar la posición deseada, y un controlador de altitud interno que persigue los ángulos de balanceo y cabeceo anteriores más un ángulo de guiñada externo. En [Mosco-Luciano, 2019] se propone una estrategia de control no lineal para resolver el problema de seguimiento de trayectoria sobre la carga transportada por un vehículo multirrotor, basado en un modelo que aprovecha las características entre las fuerzas que interactúan sobre el vehículo y la carga suspendida a través de un cable.

En [Liu, 2019] se propone un esquema de control PID híbrido basado en lógica difusa para evitar colisiones y un método de seguimiento de ruta basado en la predicción de errores cruzados. La arquitectura híbrida combina estrategias para evitar colisiones tanto globales como locales, al tiempo que cumple con las normas de tráfico aéreo. En [Mobarez, 2019] se presenta la implementación de un controlador PID sintonizado a través de un algoritmo genético y de un controlador PID optimizado basado en el control óptimo local, los cuales están diseñados para evaluar y mejorar la respuesta del piloto automático de un vehículo aéreo no tripulado. La robustez que tiene el sistema de piloto automático se prueba midiendo la capacidad de cada controlador para rechazar las perturbaciones del viento y atenuar los ruidos generados por los sensores. El controlador PID sintonizado basado en el control óptimo local presenta una respuesta superior incluso en presencia de perturbaciones y ruido. En [Najm, 2019] se propone un controlador PID no lineal para estabilizar el movimiento de traslación y rotación de un vehículo aéreo no tripulado de seis grados de libertad y obligarlo a seguir una determinada trayectoria con un mínimo de energía y buscando la convergencia del error a cero.

La efectividad del controlador se demuestra a través de simulaciones en términos de velocidad y estado estable, las cuales muestran un buen desempeño. En [Shen, 2019] se propone la aplicación de un controlador difuso PID en vehículos aéreos no tripulados de cuatro rotores para solucionar el problema en el rendimiento del control de vuelo cuando se realizan operaciones agrícolas que involucran cargas en el vehículo; a través del controlador propuesto se demuestra una mayor estabilidad en la potencia de salida para mantener el rendimiento en estado estable del sistema, además se muestra que el método puede mejorar la adaptabilidad del PID y reducir la inestabilidad en el control de altitud de vuelo durante la operación del vehículo. El objetivo de este trabajo consiste en proponer la estimación algebraica en línea de la masa de un vehículo aéreo de cuatro rotores. La masa estimada se integra satisfactoriamente en un controlador de movimiento PD. Asimismo, se utiliza un polinomio de Bézier para la planificación de las trayectorias de referencia.

## **2. Métodos**

### **Vehículo aéreo de cuatro rotores**

Un vehículo aéreo de cuatro rotores, conocido como quadrotor o también llamado cuadricóptero, es un helicóptero multirotor que es levantado y propulsado por cuatro rotores; para su soporte y elevación los cuatro rotores deben estar colocados en las extremidades del cuerpo del vehículo [Beltran, 2022]. Con el propósito de mantener el quadrotor estable es necesario utilizar dos conjuntos de hélices fijas idénticas, dos que giren en sentido horario y dos que giren en sentido antihorario.

Como se menciona en [Yáñez, 2016], el movimiento vertical y lateral del quadrotor se produce mediante diversas combinaciones de las fuerzas inducidas por los dos pares de rotores, donde un incremento o decremento de la velocidad angular corresponde con una longitud mayor o menor de las flechas, como se ilustra en la figura 1. La fuerza principal de sustentamiento o empuje (*thrust*) le permite elevarse y descender, mientras que el movimiento lateral se produce cuando la velocidad de uno de los rotores de un par aumenta o disminuye; es decir, cuando se genera un momento de par o torque (cabeceo o *pitch* y alabeo o *roll*), manteniendo constante la velocidad de los rotores del otro par. Por último, si la velocidad de un par de

rotores disminuye de manera uniforme y la velocidad del otro par se mantiene constante, el vehículo gira respecto a su eje vertical (movimiento de guiñada o yaw).

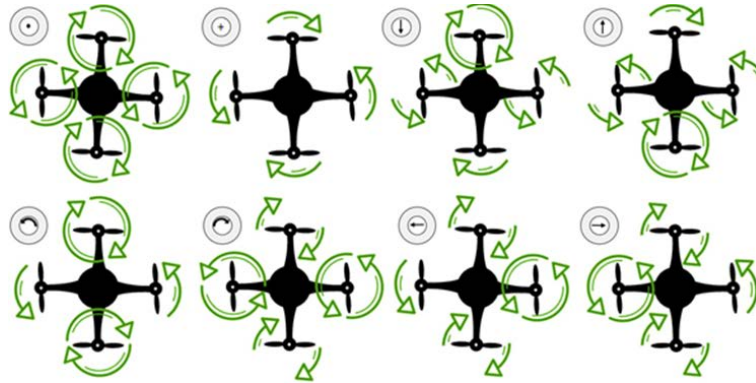


Figura 1 Combinaciones de movimiento de un quadrotor.

### Modelo dinámico de un vehículo aéreo de cuatro rotores

Un quadrotor es un sistema subactuado, debido a que posee un número mayor de grados de libertad en comparación con sus entradas de control. Además, su modelo dinámico es no lineal y altamente acoplado. El movimiento del vehículo en el espacio se logra mediante la regulación efectiva de cuatro entradas de control, que son una fuerza principal de sustentado  $u$  y tres torques  $\tau_\phi$ ,  $\tau_\theta$  y  $\tau_\psi$ , uno de los modelos que se han obtenido y validado en [Ibarra, 2021] se presenta a través de un conjunto de expresiones, ecuación 1. En las que  $x, y, z$  representan la posición del vehículo y  $\phi, \theta, \psi$  su orientación. Además,  $m$  masa del vehículo,  $g$  constante de aceleración gravitacional y  $J_x, J_y, J_z$  elementos del tensor de inercia del cuerpo del vehículo.

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} &= -u \sin \theta \\
 m\ddot{y} &= u \cos \theta \sin \phi \\
 m\ddot{z} &= u \cos \theta \cos \phi - mg \\
 J_x \ddot{\phi} &= (J_y - J_z) \dot{\theta} \dot{\psi} + \tau_\phi \\
 J_y \ddot{\theta} &= (J_z - J_x) \dot{\phi} \dot{\psi} + \tau_\theta \\
 J_z \ddot{\psi} &= (J_x - J_y) \dot{\phi} \dot{\theta} + \tau_\psi
 \end{aligned} \tag{1}$$

### Identificación de la masa de un Quadrotor

Con el fin de demostrar el esquema de estimación de la masa del vehículo quadrotor a través del método algebraico [Beltran, 2015] solo se considera la

dinámica del movimiento vertical, la cual es fundamental para llevar a cabo tareas de despegue y aterrizaje, esta expresión queda descrita por la ecuación 2.

$$m\ddot{z} = u \cos \theta \cos \phi - mg \quad (2)$$

Se puede notar que tanto el movimiento lateral  $\phi \approx 0$  como el longitudinal  $\theta \approx 0$  se consideran lo suficientemente pequeños; sin embargo, este método también puede extenderse para casos donde esta consideración no se cumple.

La sustentación o *hovering* es una condición estable de vuelo que se requiere en aplicaciones como el monitoreo e inspección a nivel industrial, por este motivo es indispensable proponer esquemas de control con la capacidad de estabilizar al sistema en esta condición operativa. Considerando la dinámica simplificada de un vehículo aéreo de cuatro rotores, definida en la ecuación 3.

$$m\ddot{z} = u - mg \quad (3)$$

El efecto del peso del vehículo actúa como una perturbación constante, lo cual queda expresado en la ecuación 4. En la que  $u$  es la fuerza principal de sustento y empuje, y  $\xi$  es la perturbación, ecuación 5.

$$m\ddot{z} = u + \xi \quad (4)$$

$$\xi = mg = cte \quad (5)$$

Aplicando la Transformada de Laplace a la dinámica simplificada del vehículo se obtiene la ecuación 6.

$$m(s^2 z(s) - sz_0 - \dot{z}_0) = u(s) + \frac{mg}{s} \quad (6)$$

O de manera desarrollada queda expresada en la ecuación 7.

$$ms^3 z(s) = sz(s) + mz_0 s^2 + m\dot{z}_0 s + mg \quad (7)$$

Derivando la ecuación 7 tres veces con respecto a  $s$  se obtiene la ecuación 8.

$$\left( 6z(s) + 18s \frac{dz(s)}{ds} + 9s^2 \frac{d^2 z(s)}{ds^2} + s^3 \frac{d^3 z(s)}{ds^3} \right) m = 3 \frac{d^2 u(s)}{ds^2} + s \frac{d^3 u(s)}{ds^3} \quad (8)$$

Al multiplicar la ecuación 8 por  $s^{-3}$  se obtiene la ecuación 9.

$$\left( 6s^{-3} z(s) + 18s^{-2} \frac{dz(s)}{ds} + 9s^{-1} \frac{d^2 z(s)}{ds^2} + \frac{d^3 z(s)}{ds^3} \right) m = 3s^{-3} \frac{d^2 u(s)}{ds^2} + s^{-2} \frac{d^3 u(s)}{ds^3} \quad (9)$$

Entonces, en el dominio del tiempo, la ecuación 9 puede expresarse como en la ecuación 10.

$$\left(6 \int^{(3)} z - 18 \int^{(2)} tz + 9 \int t^2 z - t^3 z\right) m = 3 \int^{(3)} t^2 u - \int^{(2)} t^3 u \quad (10)$$

Donde  $\int^{(n)}$  representa la  $n$ -ésima integral iterada con respecto del tiempo. La ecuación 10 se utiliza para estimar la masa del vehículo mediante la ecuación 11.

$$(den)\hat{m} = num \quad (11)$$

Aquí  $\hat{m}$  es la masa estimada por el método algebraico. Los elementos de la ecuación 11 pueden calcularse mediante las expresiones de la ecuación 12.

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= \eta_2 + 9t^2 y \\ \dot{\eta}_2 &= \eta_3 - 18ty \\ \dot{\eta}_3 &= 6y \\ \dot{\eta}_4 &= \eta_5 \\ \dot{\eta}_5 &= \eta_6 - t^3 u \\ \dot{\eta}_6 &= 3t^2 u \end{aligned} \quad (12)$$

El numerador de la ecuación 11 queda definido por la ecuación 13, mientras que la expresión del denominador queda en la ecuación 14.

$$num = \eta_4 \quad (13)$$

$$den = \eta_1 - t^3 y \quad (14)$$

### Control de movimiento y planificación de trayectorias

En esta sección se introduce un controlador de la familia Proporcional-Derivativo con una prealimentación (*feed-forward*) de las trayectorias de referencia. Considere la dinámica vertical en su forma estándar dada por la ecuación 15.

$$\ddot{z} = \frac{1}{m} u - g \quad (15)$$

De acuerdo con esto, se propone la ley de control expresada en la ecuación 16.

$$u = m(v_z + g) \quad (16)$$

En donde  $v_z$  es un controlador de la familia PD dado por la ecuación 17.

$$v_z = \ddot{z}^* - k_p e - k_d \dot{e} \quad (17)$$

En la que  $\ddot{z}^*$  es la segunda derivada de la trayectoria de referencia y  $e = z - z^*$  es el error de seguimiento. Sustituyendo la ecuación 16 y 17 en la ecuación 15, se obtiene la dinámica en lazo cerrado expresada por la ecuación 18.

$$\ddot{z} - \ddot{z}^* = -k_p e - k_d \dot{e} \quad (18)$$

La cual queda reescrita en términos del error, de acuerdo a lo que se muestra en la ecuación 19.

$$\ddot{e}_z + k_d \dot{e} + k_p e = 0 \quad (19)$$

Con la finalidad de garantizar estabilidad en lazo cerrado se deben seleccionar las ganancias de tal manera que  $k_d, k_p > 0$ . Por otro lado, mediante la técnica de asignación de polos se considera el polinomio deseado de la ecuación 20.

$$P_d(s) = s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2 \quad (20)$$

De esta forma pueden seleccionarse las ganancias de tal manera que  $k_d = 2\zeta\omega_c$  y  $k_p = \omega_c^2$ . En este trabajo se seleccionó una frecuencia natural de  $\omega_c = 3$  rad/s y una relación de amortiguamiento de  $\zeta = 0.707$ , con el fin de mostrar la efectividad de la propuesta aun cuando se consideran valores de ganancia pequeños.

### 3. Resultados

Con el propósito de mostrar la eficiencia del esquema de control propuesto, se presentan dos experimentos numéricos a nivel simulación. En el primero de ellos se prueba el esquema de estimación rápida algebraica sin considerar variaciones de la masa. En la figura 2 se muestra el seguimiento de la trayectoria de referencia en dirección  $z$ . Cabe mencionar que se utiliza un polinomio de interpolación de Bézier para la trayectoria de referencia, el cual permite suavizar la transición entre la posición inicial y final. El polinomio de Bézier [Beltran, 2020] está dado por la ecuación 21. De la cual, su componente queda descrita en la ecuación 22.

$$\Gamma^* = \begin{cases} \Gamma_i & 0 \leq t < T_1 \\ \Gamma_i + (\Gamma_f - \Gamma_i)B_z(t, T_1, T_2) & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \Gamma_f & t > T_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$B_z(t, T_1, T_2) = \sum_{k=0}^n \gamma_k \left( \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \right)^k \quad (22)$$



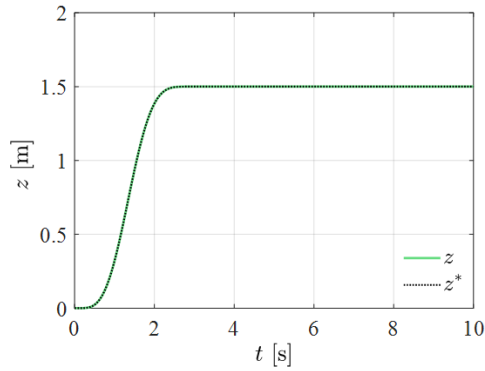


Figura 2 Seguimiento de la trayectoria de referencia, experimento 1.

con  $n = 6$ ,  $\gamma_1 = 252$ ,  $\gamma_2 = 1050$ ,  $\gamma_3 = 1800$ ,  $\gamma_4 = 1575$ ,  $\gamma_5 = 700$  y  $\gamma_6 = 126$ . Para los experimentos se ha seleccionado a  $T_1 = 0$  s,  $T_2 = 3$  s,  $\Gamma_i = 0$  m y  $\Gamma_f = 1.5$  m.

En la figura 3 se observa la señal de control requerida para realizar el seguimiento mostrado; la figura 4 presenta la gráfica con la estimación algebraica de la masa.

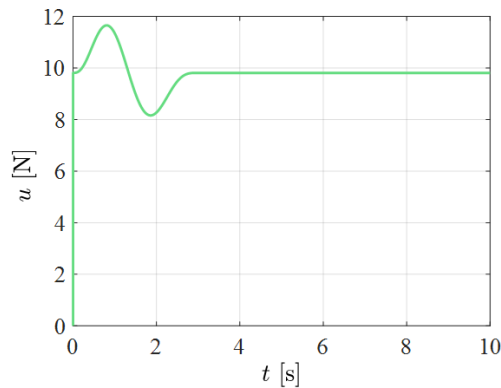


Figura 3 Entrada de control  $u$ , experimento 1.

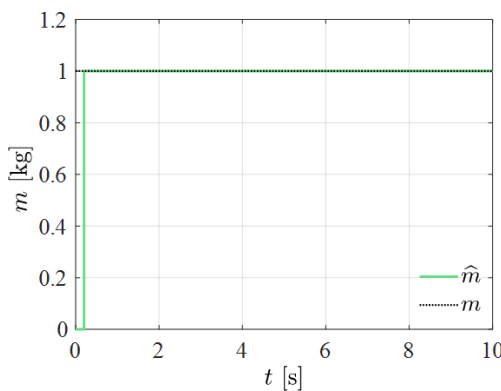


Figura 4 Estimación algebraica de la masa, experimento 1.

En figura 4 se puede observar la rapidez con que se estima la masa mediante el método algebraico en un lapso reducido. En las figuras la línea discontinua indica la trayectoria de referencia y el valor real de la masa, respectivamente.

En el segundo experimento se varía intencionalmente el valor de la masa de 0.8 kg a 1.25 kg después de 10 segundos que ha iniciado la simulación. En el primer caso del segundo experimento no se realiza la estimación de la masa. En la figura 5 y 6 se observa el seguimiento de la trayectoria de referencia y la entrada de control. En la primera de ellas se observa que el seguimiento es afectado por la variación paramétrica de la masa, ya que no es compensada adecuadamente por el controlador PD con los parámetros antes mencionados.

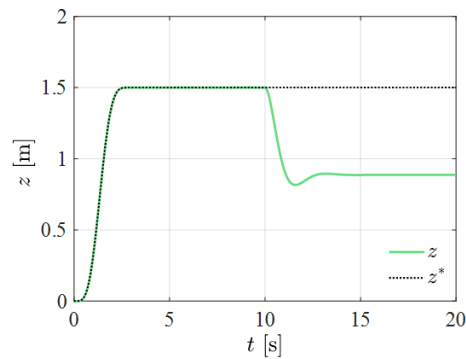


Figura 5 Seguimiento de la trayectoria de referencia, experimento 2a.

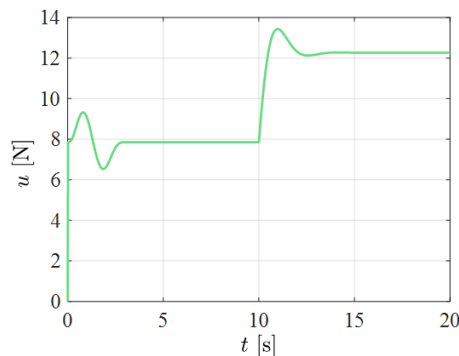


Figura 6 Entrada de control  $u$ , experimento 2a.

En el segundo caso del segundo experimento, cuando el sistema detecta que el error de seguimiento sale del umbral permitido (0.05), se ejecuta de manera sistemática la estimación de la masa, al tiempo que se realiza un ajuste en la señal

del controlador de movimiento, lo que se puede corroborar a partir de la gráfica presentada en la figura 7. En esta figura se observa que la inclusión de la masa estimada en el esquema de control mejora de manera considerable la respuesta del sistema en lazo cerrado. En las figuras 8 y 9 se muestra la entrada de control y la estimación de la masa, en ellas se puede corroborar una adecuada integración de la masa estimada. Se puede notar que, a pesar de la variación de la masa, el controlador permite al quadrotor recuperarse y volver a la posición deseada.

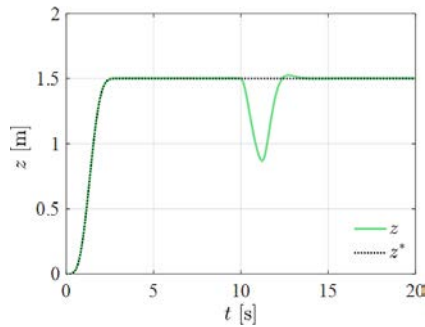


Figura 7 Seguimiento de la trayectoria de referencia, experimento 2b.

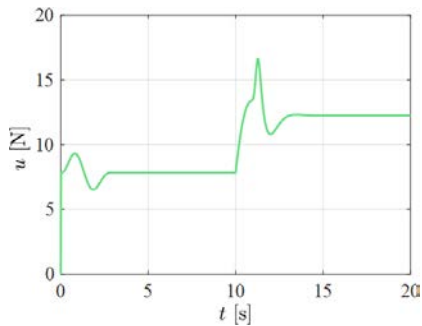


Figura 8 Entrada de control  $u$ , experimento 2b.

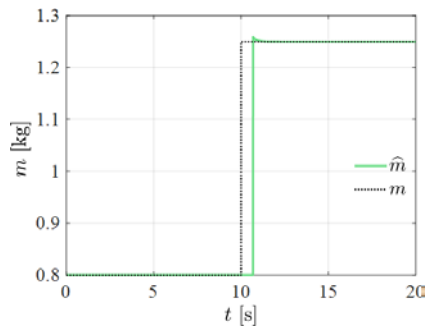


Figura 9 Estimación algebraica de la masa, experimento 2b.

## 4. Discusión

La estimación en vehículos autónomos puede mejorar considerablemente el desempeño de estos sistemas ante incertidumbre paramétrica, como la masa. En los vehículos aéreos autónomos es de gran importancia asegurar la estabilidad del sistema, ya que en algunos esquemas la planificación de trayectorias también depende de los parámetros del sistema. Por ejemplo, en la literatura se ha presentado un número importante de trabajos donde las referencias del desplazamiento angular,  $\phi^*$  y  $\theta^*$ , se determinan basándose en el modelo presentado en la ecuación 1, a través de las ecuaciones 23 y 24 [Yañez, 2021].

$$\theta^* = \sin^{-1} \left( -\frac{mv_x}{u} \right) \quad (23)$$

$$\phi^* = \sin^{-1} \left( \frac{mv_y}{u \cos \theta} \right) \quad (24)$$

Donde es evidente la dependencia de la información de la masa para determinar adecuadamente las trayectorias de referencia del movimiento lateral y longitudinal y asegurar de esta manera los desplazamientos en las direcciones  $x$  y  $y$ . También es importante destacar que el controlador propuesto podría mejorar la respuesta del sistema conforme se incrementan las ganancias de control a valores muy grandes; sin embargo, esto podría saturar los actuadores bajo ciertas condiciones operativas. Un ejemplo práctico de la propuesta descrita se encuentra en el uso para detección termográfica, como en la figura 10; esta es una aplicación industrial que se enfoca principalmente en áreas donde se hace uso de procesos que desprenden vapores o gases. En estos casos el vehículo aéreo está equipado con un sistema de detección termográfica que le permite observar el estado de los ductos por los cuales transitan los vapores o gases en cuestión. La finalidad es el monitoreo y la prevención de fugas por daños en los ductos, como se puede ver en la figura 11. Otra aplicación en la que es importante realizar la estimación de parámetros de los vehículos aéreos es durante las operaciones de transporte y entrega de objetos, como se puede ver en la figura 12. La principal preocupación en este tipo de aplicaciones, al diseñar el sistema de control, es la naturaleza de la carga. Tener que manejar múltiples cargas diferentes implica que existe una gran variación en la

naturaleza de la carga. Esto presenta una preocupación ya que afecta el desempeño del control [Outeiro, 2021]. Por lo tanto, las soluciones de control y estimación, como el método que se presenta en este trabajo, son muy deseables debido a que son robustas a parámetros inciertos.



Figura 10 Sistema aéreo de detección termográfica en una planta industrial [FLIR, 2011].

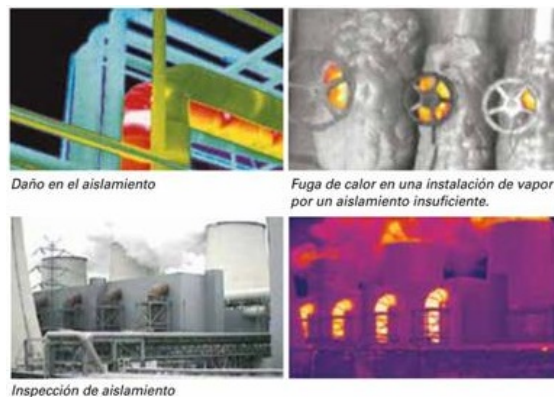


Figura 11 Fallas detectadas por medio del monitoreo de un vehículo aéreo [FLIR, 2011].



Figura 12 Vehículo aéreo para aplicaciones de entrega de objetos [Post & Parcel, 2022].

## 5. Conclusiones

En este trabajo se propone la estimación en línea de la masa de un vehículo aéreo de cuatro rotores mediante un esquema algebraico. Para la estimación se requiere solamente de información sobre la salida deseada y la entrada de control. Para fines de representar la eficiencia de la propuesta, solamente se ha considerado el desplazamiento vertical; sin embargo, en futuros trabajos se incluirá la estimación de la masa para el control del movimiento lateral y longitudinal del vehículo. En los vehículos aéreos es fundamental contar con un método para estimar la masa del sistema, ya que en casi todas las aplicaciones se requiere contar con la mayor estabilidad posible durante la ejecución de las tareas asignadas, el método de estimación algebraica permite que, aunque se haya implementado un esquema de control sencillo el vehículo logre estabilizarse y continuar con la consigna requerida.

## 6. Referencias

- [1] Beltran-Carbajal, F., & Silva-Navarro, G. (2015). On the algebraic parameter identification of vibrating mechanical systems. *International Journal of Mechanical Sciences*, 92, 178-186.
- [2] Beltran-Carbajal, F., & Silva-Navarro, G. (2020). Output feedback dynamic control for trajectory tracking and vibration suppression. *Applied Mathematical Modelling*, 79, 793-808.
- [3] Beltran-Carbajal, F., Yañez-Badillo, H., Tapia-Olvera, R., Favela-Contreras, A., Valderrabano-Gonzalez, A., & Lopez-Garcia, I. (2022). On Active Vibration Absorption in Motion Control of a Quadrotor UAV. *Mathematics*, 10(2), 235.
- [4] Ibarra-Jimenez, E., Castillo, P., & Abaunza, H. (2020). Nonlinear control with integral sliding properties for circular aerial robot trajectory tracking: Real-time validation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 30(2), 609-635.
- [5] Mobarez, E. N., Sarhan, A., & Mohamed, A. M. (2019, September). Modeling of fixed wing UAV and design of multivariable flight controller using PID tuned by local optimal control. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 610, No. 1, pp. 012016. IOP Publishing.

- [6] FLIR. Guía de termografía para mantenimiento predictivo, (2011). Guía informativa del uso de cámaras termográficas en aplicaciones industriales. [https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264\\_ES.pdf](https://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_ES.pdf).
- [7] Liu, Z., Zhang, Y., Yuan, C., Ciarletta, L., & Theilliol, D. (2019). Collision avoidance and path following control of unmanned aerial vehicle in hazardous environment. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 95(1), 193-210.
- [8] Mosco-Luciano, A. P., Rodríguez-Cortés, H., & Castro-Linares, R. (2019, October). Seguimiento de trayectoria de un cuatrorotor con carga suspendida. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático CNCA 2019*.
- [9] Najm, A. A., & Ibraheem, I. K. (2019). Nonlinear PID controller design for a 6-DOF UAV quadrotor system. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(4), 1087-1097.
- [10] Outeiro, P., Cardeira, C., & Oliveira, P. (2021). Multiple-model adaptive control architecture for a quadrotor with constant unknown mass and inertia. *Aerospace Science and Technology*, 117, 106899.
- [11] Post & Parcel. 2022. Flirtey and 7Eleven hail home drone delivery | Post & Parcel. [online] Available at: <<https://postandparcel.info/74430/news/faa-approved-home-drone-delivery/>> [Accessed 23 September 2022].
- [12] Sheng, G., & Gao, G. (2019). Research on the attitude control of civil quadrotor UAV based on fuzzy PID control. In *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)* (pp. 4566-4569). IEEE.
- [13] Trapiello Fernández, C. (2018). Control of an UAV using LPV techniques (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [14] Yáñez-Badillo, H., Tapia-Olvera, R., Beltran-Carbajal, F., Aguilar-Mejia, O. (2016). Modelado Matemático y Control PD de un Quadrotor. *Difu100ci@*, *Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías*, 10(1), 19-27.
- [15] Yáñez-Badillo, H., Beltran-Carbajal, F., Tapia-Olvera, R., Favela-Contreras, A., Sotelo, C., & Sotelo, D. (2021). Adaptive robust motion control of quadrotor systems using artificial neural networks and particle swarm optimization. *Mathematics*, 9(19), 2367.