

Desarrollo y Construcción de una Plataforma Experimental de un UAV para pruebas de Control Automático

G. Ortiz-Torres*, R. Schacht-Rodríguez*,
M. E. Guerrero-Sánchez**, J. Reyes-Reyes*,
C. D. García-Beltrán*

* Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico -
CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, 62490,
Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: gortiztrr@cenidet.edu.mx).

** Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos - ITESCO,
Carretera Antigua Mina-Coatza, km. 16.5, Col. Reserva Territorial,
96536, Coatzacoalcos, Veracruz, México

Resumen: La principal contribución del presente artículo es el desarrollo y la construcción de una plataforma experimental para un vehículo plano de despegue y aterrizaje vertical (PVTOL) considerando la dinámica de la traslación y la rotación del vehículo. Se presenta la instrumentación de la plataforma experimental explicando cómo el sistema propuesto mide la posición y el desplazamiento rotacional del UAV. Se muestra un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) en cascada aplicado al vehículo resolviendo el acoplamiento entre la dinámica traslacional y rotacional en el PVTOL utilizando la plataforma experimental propuesta. Finalmente, se exhibe la efectividad de la plataforma experimental mostrando su capacidad para utilizarse en diferentes estrategias de control automático.

Keywords: Control de Sistemas No Lineales; Control robusto; Vehículo Aéreo no Tripulado; Implementación Práctica.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha habido un interés creciente en el control de los vehículos aéreos no tripulados. Esta popularidad se debe a la capacidad de llevar a cabo una amplia gama de aplicaciones, por ejemplo: cinematografía aérea, misiones de búsqueda y de rescate, vigilancia de incendios forestales, detección de derrame de petróleo, entrega de paquetería, agricultura de precisión, monitoreo de sistemas de comunicaciones, entre otros, Derafa et al. (2012).

El vehículo aéreo plano con capacidad de despegue y aterrizaje vertical o PVTOL es un sistema dinámico no lineal que representa un reto desafiante para el control del movimiento. No obstante, el control de cualquier vehículo aéreo que pueda despegar verticalmente como un helicóptero puede desarrollarse usando el modelo de un PVTOL. Así, el modelo matemático de un PVTOL se ha convertido en un punto de referencia en la ingeniería aeroespacial.

El problema de control del PVTOL es seguir la trayectoria deseada manteniendo el ángulo de rotación de alabeo en cero. La estabilización del ángulo de alabeo durante el seguimiento de la trayectoria es un desafío, debido a la tendencia de los aviones a oscilar alrededor del eje longitudinal por las fuerzas aplicadas.

El sistema PVTOL tiene un mínimo número de estados y entradas, comparado con otros vehículos aéreos, Lara

et al. (2014) y Ortiz et al. (2016), sin embargo, el diseño de controladores para el seguimiento de trayectorias del PVTOL no es trivial, debido a que es necesario considerar la dependencia que existe entre las dinámicas rotacional y traslacional. Existen investigaciones donde se proponen estrategias de control para solucionar este problema, por ejemplo: en Lin et al. (1999) se estudia un controlador robusto, para lo cual se emplea un enfoque de control óptimo. En Aguilar-Ibañez et al. (2015) se presenta un control para resolver el problema de regulación para un PVTOL. El método propuesto se divide en dos acciones de control por retroalimentación simultáneas: la primera estabiliza la posición vertical mientras que la segunda controla la posición horizontal y el ángulo de alabeo. Además, en Car et al. (2011) se introduce la técnica de control por modos deslizantes para un PVTOL en simulación. Por otro lado, en Ortiz-Torres et al. (2016) se presenta un controlador para el seguimiento de trayectorias y un sistema de detección y aislamiento de fallas utilizando una representación quasi-Lineal con Parámetros Variables (qLPV) del vehículo PVTOL. Son varias las estrategias de control propuestas en la literatura, sin embargo, la mayoría no presenta resultados experimentales, es por eso que en el presente trabajo se diseña y elabora una plataforma experimental para la implementación y prueba de sistemas de control de un vehículo PVTOL. La instrumentación desarrollada y software utilizado, permiten la implementación de otros algoritmos de control, observadores de estado, sistemas de detección y aislamiento de fallas, rutinas de

predicción de averías y estrategias de control tolerante a fallas.

En este trabajo se presenta el desarrollo y la elaboración de un sistema experimental PVTOL y de una plataforma experimental para implementar sistemas de control en el vehículo aéreo. El artículo se divide de la siguiente manera: la Sección 2 introduce el modelo matemático del PVTOL. La Sección 3 muestra el diseño y la elaboración del prototipo, también introduce la instrumentación y las partes electrónicas que lo forman. La Sección 4 presenta los detalles del diseño y de la elaboración de la plataforma experimental. La Sección 5 muestra los resultados experimentales aplicando controladores PIDs en cascada. Finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones.

2. MODELO MATEMÁTICO DEL PVTOL

El vehículo PVTOL está compuesto de dos motores independientes con dos propelas para producir la fuerza de empuje f_i y un par τ_θ en dirección del eje de rotación de las propelas. La propela 1 gira en dirección contraria a las manecillas del reloj, mientras que la propela 2 gira en dirección de las manecillas del reloj, como se muestra en la Fig. 1. Aumentando o disminuyendo la velocidad de los motores en la misma magnitud, se logra un desplazamiento vertical en el eje z . Cambiando inversamente la velocidad de los motores 1 y 2 se produce una rotación en alabeo θ acoplado a un desplazamiento lateral en el eje x . Se denota $\mathbf{E} = \{O_e, x_e, z_e\}$ como el marco de referencia inercial fijo en tierra, y $\mathbf{Q} = \{O_q, x_q, z_q\}$ define el marco fijo al cuerpo del vehículo, cuyo origen es el centro de masa del PVTOL.

Con el propósito de diseñar un algoritmo de control efectivo, se consideran las siguientes suposiciones:

- La estructura del vehículo es rígida y simétrica,
- El centro de masa y O_q coinciden,
- Las propelas son rígidas,
- El empuje y el arrastre son proporcionales al cuadrado de las velocidades de las propelas,
- El par de alabeo genera una fuerza perpendicular al eje z .
- La dinámica en guiñada se ignora.

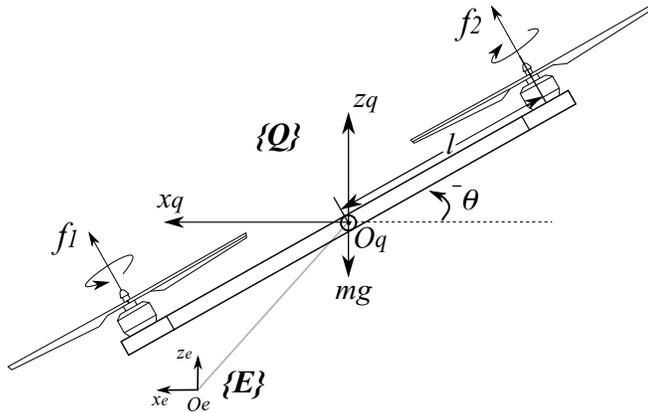


Fig. 1. Configuración del PVTOL.

Utilizando el formalismo de Newton-Euler, la dinámica de un cuerpo rígido con un desplazamiento plano y bajo fuerzas externas se representa por:

$$\begin{aligned} J\dot{\omega} &= \tau_\theta \\ \dot{\xi} &= \mathbf{v} \\ m\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{R}\mathbf{z} \sum_{i=1}^2 f_i + m\mathbf{g}, \end{aligned} \quad (1)$$

donde $\xi = (x, z)^\top \in \mathbb{R}^2$ denota la posición del vehículo con respecto al marco \mathbf{E} y $(A)^\top$ representa la matriz transpuesta de A . La velocidad lineal se denota por $\mathbf{v} \in \mathbf{E}$, $\omega = \dot{\theta}$ es la velocidad de alabeo definida en el marco \mathbf{Q} y m es la masa total del vehículo. El momento de inercia J es expresado en el marco \mathbf{Q} , τ_θ es el par de alabeo definido en \mathbf{E} . La aceleración producida por la gravedad se representa por $\mathbf{g} = (0, -9.81)^\top$. La rotación del marco del vehículo con respecto al marco inercial está dada por la matriz de rotación \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta \\ \text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Las fuerzas que actúan en el vehículo son el peso $m\mathbf{g}$ y las dos fuerzas generadas por las propelas f_i , las cuales actúan en dirección al eje de rotación de las propelas $\mathbf{z} = (0, 1)^\top$. El momento en alabeo se define por:

$$\tau_\theta = l(f_1 - f_2), \quad (3)$$

donde l es la distancia respecto a los motores y el centro de gravedad. Cada propela gira alrededor del eje \mathbf{z} en el marco fijo al vehículo con una velocidad angular Ω_i . La fuerza de empuje y el par generalizado se expresan como una relación del cuadrado de la velocidad angular de cada propela, tal que:

$$f_i = d \cdot \Omega_i^2, \quad (4)$$

donde $d > 0$ es un parámetro constante que caracteriza la eficiencia de las propelas y se llama factor de empuje. Utilizando y aplicando las consideraciones anteriormente mencionadas, se obtiene el siguiente modelo no lineal del PVTOL:

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} &= lu_2 \\ m\ddot{z} &= -mg + \cos\theta u_1 \\ m\ddot{x} &= -\text{sen}\theta u_1, \end{aligned} \quad (5)$$

donde u_1 y u_2 son las entradas de control del sistema, definidas por:

$$\begin{aligned} u_1 &= d \cdot (\Omega_1^2 + \Omega_2^2) \\ u_2 &= d \cdot (\Omega_1^2 - \Omega_2^2). \end{aligned} \quad (6)$$

El sistema (5) se puede reescribir mediante la representación de espacio de estado utilizando el vector de estado $\mathbf{x} = [\theta, \dot{\theta}, z, \dot{z}, x, \dot{x}]^\top$, y un vector de entrada definido por $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^\top$, tal que se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{J} \\ 0 & 0 \\ b_1 \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 \\ -u_x \frac{1}{m} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{y} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}, \end{aligned} \quad (7)$$

con:

$$b_1 = \cos\theta \quad (8)$$

$$u_x = \text{sen}\theta, \quad (9)$$

donde \mathbf{y} es el vector de salidas medidas y u_x es una entrada virtual, que será explicada en la sección de resultados experimentales.

A continuación se presenta la descripción del prototipo PVTOL y de la plataforma experimental.

3. PROTOTIPO EXPERIMENTAL PVTOL

El PVTOL se diseña para que se desplace en un espacio de 2 dimensiones sobre un plano inclinado. El vehículo se compone de dos motores de corriente directa que giran en direcciones opuestas uno del otro, y cada motor tiene una propela diferente, dependiendo del sentido de giro del motor. Las propelas tienen una longitud de 46 mm, el tamaño de los motores es de 7×16 mm con un eje de 0.8 mm y el voltaje de alimentación de cada motor es de 3.7 V. Para controlar la velocidad de los motores se utiliza el circuito *Dual Driver* DRV8835 con un amperaje máximo de 1.2 A por canal. El controlador de velocidad de los motores recibe la señal por Modulación de Ancho de Pulsos (PWM, por sus siglas en inglés) y la envía a los motores con el amperaje requerido.

El PVTOL cuenta con dos marcas de color negro (ver Fig. 2), que serán utilizadas para conocer la posición y la orientación del vehículo, como se explicará en la siguiente sección.

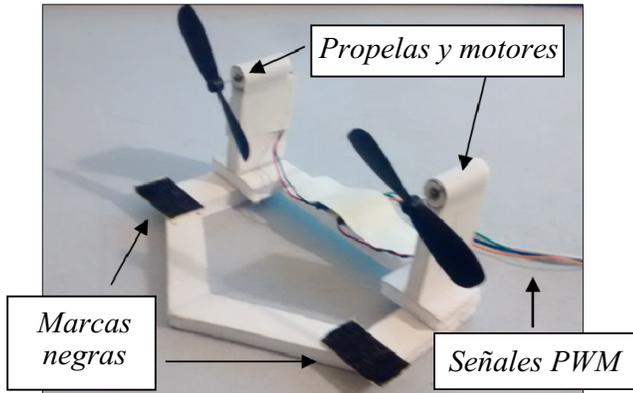


Fig. 2. Prototipo PVTOL.

Los parámetros del vehículo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del PVTOL.

Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad
m	0.017	kg	l	0.04	m
g	9.81	m/s ²	Ω_{max}^2	4.38×10^6	rad ² /s ²
d	2.47×10^{-8}	Ns ² /rad ²	p_1	2.47×10^{-7}	PWMs ² /rad ²
J	1.75×10^{-5}	kgm ²	p_2	-0.049	PWMs ² /rad ²

El parámetro aerodinámico d se calcula realizando pruebas de empuje con una báscula y midiendo la velocidad angular de las propelas con un sensor infrarrojo. Los resultados experimentales utilizados para obtener el parámetro d se muestran en la Fig. 3(a). En esta figura se observa la relación lineal que existe entre la fuerza de empuje y la velocidad angular de las propelas. Los parámetros p_1 y p_2 representan la relación lineal entre el cuadrado de la velocidad angular de las propelas y la señal PWM, y se obtienen utilizando la Fig. 3(b). Los parámetros antes mencionados son necesarios para la implementación experimental ya que físicamente no es posible medir en

línea la fuerza y el par generados. Por otro lado, medir la velocidad angular de las propelas, implica incorporar sensores adicionales, los cuales limitarían la capacidad de vuelo e incrementarían la instrumentación del prototipo. Sin embargo, existe una relación lineal entre las fuerzas de empuje y el par con respecto al cuadrado de la velocidad angular de las propelas y la señal PWM, como se muestra en Choi et al. (2015). Entonces, la señal de control generada por el controlador será una fuerza y un par que se transformarán a velocidades angulares y, finalmente, se convertirán a señales PWM necesarias para que se cumplan los objetivos de control. Cabe señalar que ambos actuadores (motor-propela) se consideran iguales. Finalmente, utilizando la ecuación (6) y la Fig. 3 es posible encontrar la relación de las señales de control a las señales PWM, como se muestra a continuación:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} d/p_1 & d/p_1 \\ d/p_1 & -d/p_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{PWM}_1 - p_2 \\ \text{PWM}_2 - p_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

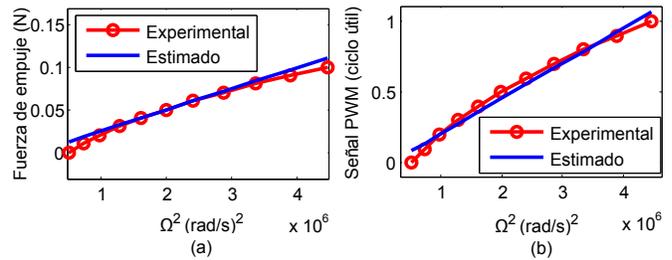


Fig. 3. Relación lineal entre el cuadrado de la velocidad angular de la propela y la: (a) fuerza de empuje, (b) señal PWM.

4. PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA EL PVTOL

La plataforma experimental se compone de una cámara de video, una computadora, una tarjeta de *National Instruments* (NI), llamada NI myRIO®, una batería de polímero de litio de 3.7 V y un plano inclinado, como se muestra en la Fig. 4.

Para calcular la posición y la orientación del vehículo se utilizan herramientas para el reconocimiento y el procesamiento de imágenes, utilizando un software de *National Instruments*, llamado NI LabVIEW®. Dicho procesamiento de imágenes implica un elevado gasto computacional para ser realizado únicamente con la tarjeta NI myRIO®, por esta razón se dividen las tareas en dos programas: un programa que se ejecuta en la computadora, y otro en la tarjeta NI myRIO®.

A continuación se explican los programas realizados en cada uno de los sistemas y también se explican a detalle las partes más importantes de la plataforma experimental.

4.1 Cámara de video

Se utiliza una cámara de video estándar configurada con 640×480 píxeles de resolución; y se ubica en una orientación igual a la del plano inclinado. Mediante la cámara de video y el procesamiento de imágenes adquiridas en la computadora se calculan la posición $z - x$ y el ángulo de

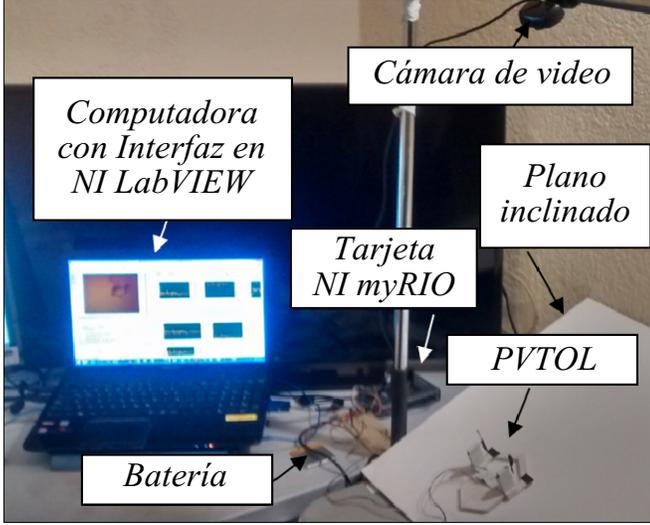


Fig. 4. Partes de la plataforma experimental.

rotación de alabeo θ del vehículo, como se muestra en la Fig. 5. También se presenta la detección de las marcas negras del PVTOL. El ángulo de rotación de alabeo θ se obtiene con la siguiente expresión (la cual se emplea para calcular la pendiente de una recta):

$$\theta = \arctan\left(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (11)$$

donde x_1 y x_2 son las posiciones en el eje x en pixeles de las marcas 1 y 2, respectivamente. Las posiciones en el eje z en pixeles de las marcas 1 y 2, se representan por z_1 y z_2 .



Fig. 5. Detección de marcas negras del PVTOL para calcular la posición y la orientación del vehículo.

4.2 Computadora con Interfaz de usuario

En la computadora se programa la interfaz virtual de usuario, que realiza lo siguiente: i) Procesa la información de la posición y la orientación del vehículo para generar la señal de control, ii) Convierte la señal de control de la fuerza de empuje y el par rotacional a una señal PWM y finalmente, iii) Envía a la red por medio del puerto USB

la variable con la información de la señal de control PWM generada.

4.3 Tarjeta NI myRIO

En la tarjeta NI myRIO se programa otra interfaz virtual de usuario, la cual realiza lo siguiente: i) Adquiere de la red por medio del puerto USB las variables con la información de las señales de control generadas y finalmente, ii) Convierte las variables de PWM a señales de PWM y las envía como salidas analógicas de la tarjeta.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La presente sección aborda la prueba experimental del prototipo PVTOL y la plataforma experimental diseñada y construida con la finalidad de probar diferentes algoritmos de control. El objetivo de control en este artículo es el seguimiento de una trayectoria de la posición del vehículo. Como se observa en (7), el ángulo rotacional θ y sus derivadas no dependen de los desplazamientos traslacionales $z - x$. Sin embargo, el desplazamiento traslacional en el eje x depende del desplazamiento rotacional θ , lo que significa que para lograr un desplazamiento en el eje x es necesario de un desplazamiento rotacional θ . Este hecho conduce a la idea de diseñar un esquema de control en cascada, como se observa en la Fig. 6.

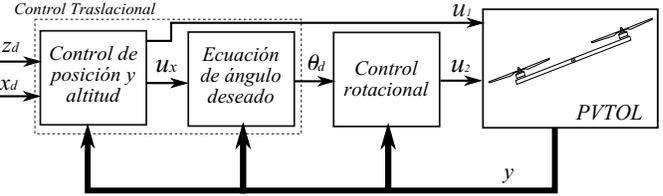


Fig. 6. Esquema de control en cascada general.

Se diseñan dos lazos de control en cascada; el lazo externo tiene como objetivo estabilizar y realizar el seguimiento de trayectoria de la posición en z y en x , y generar los valores de referencia del ángulo rotacional; mientras que el lazo interno toma el valor de referencia deseada generado por el lazo externo para lograr seguir la trayectoria del ángulo de rotación θ .

El PVTOL tiene tres salidas y solamente dos entradas, en otras palabras es un sistema sub-actuado. Por esta razón, se utiliza una entrada virtual u_x , la cual se llama virtual debido a que no es ni la fuerza de empuje ni el par, pero se utilizará como entrada de control para generar el ángulo de alabeo deseado.

Note que la dinámica en el eje x depende de la entrada u_1 , por lo tanto considerando que la entrada virtual u_x brinda la orientación de u_1 en el eje x , es posible calcular un valor deseado de alabeo utilizando la señal de control u_x . Finalmente, si se considera que u_x se conoce (calculado con el controlador de la posición en x), entonces utilizando (9), el valor del ángulo de alabeo deseado se puede obtener de la siguiente forma:

$$\theta_d = \arcsen(u_x). \quad (12)$$

Para probar la plataforma experimental aplicada al prototipo PVTOL se programan tres controladores PID con

el objetivo del seguimiento de trayectoria de la posición $z - x$. Como se mencionó anteriormente la dinámica en el eje x generará la referencia rotacional θ , cuyo objetivo del control rotacional será también el seguimiento de trayectoria.

Los algoritmos de control PIDs utilizados se describen con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= K_z \left(e_z(t) + \frac{1}{T_{iz}} \int_0^t e_z(\tau) d\tau + T_{dz} \frac{de_z(t)}{dt} \right) \\ u_x(t) &= K_x \left(e_x(t) + \frac{1}{T_{ix}} \int_0^t e_x(\tau) d\tau + T_{dx} \frac{de_x(t)}{dt} \right) \\ u_2(t) &= K_\theta \left(e_\theta(t) + \frac{1}{T_{i\theta}} \int_0^t e_\theta(\tau) d\tau + T_{d\theta} \frac{de_\theta(t)}{dt} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

donde $u_1(t)$, $u_x(t)$ y $u_2(t)$ son las variables de control para el sistema de posición en z , en x y en el ángulo de alabeo θ , respectivamente. Las señales de error de seguimiento son $e_z(t)$, $e_x(t)$ y $e_\theta(t)$ y están definidas por:

$$\begin{aligned} e_z(t) &= z_d(t) - z(t) \\ e_x(t) &= x_d(t) - x(t) \\ e_\theta(t) &= z_\theta(t) - \theta(t), \end{aligned} \quad (14)$$

donde $z_d(t)$, $x_d(t)$ y $\theta_d(t)$ son las referencias deseadas en el sistema de posición en z , en x y en el ángulo de alabeo θ , respectivamente. Las posiciones en z y en x están definidas en pixeles mientras que el ángulo de alabeo θ en grados. Cada variable de control es la suma de tres términos: un término proporcional al error, un término proporcional a la integral del error y un término proporcional a la derivada del error. Los parámetros de diseño de los controladores son: la ganancia proporcional K , la ganancia integral T_i , y la ganancia derivativa T_d ; cada uno de estos parámetros definidos con un subíndice de acuerdo al sistema de posición en z , en x y en el ángulo de alabeo θ . Finalmente, el esquema de control general incluyendo la instrumentación de la plataforma experimental y el prototipo PVTOL, se muestran en la Fig. 7. También se observan las conexiones al puerto USB con la cámara de video y con la tarjeta NI myRIO, así como los controladores PIDs en cascada.

El tiempo de muestreo del sistema completo de la Fig. 7 es de 0.143 s. Las mediciones de la posición en z y x son expresadas en pixeles, de acuerdo al espacio visual de la cámara, mientras que el ángulo de rotación se expresa en grados. Las condiciones iniciales se establecen en $z(0) = 34.84$ pixeles, $x(0) = 289.8$ pixeles, y $\theta(0) = -0.34$ grados.

La Fig. 8 muestra el seguimiento de las trayectorias en el eje z , en el eje x , y el ángulo rotacional de alabeo del prototipo PVTOL. Se puede observar un correcto seguimiento de las referencias deseadas. Las señales de control generadas con los controladores PIDs cumplen sus objetivos de estabilización y de seguimiento de la trayectoria del prototipo PVTOL. El controlador de posición en el eje x genera la referencia deseada para el controlador rotacional, como se observa en la Fig. 8(c).

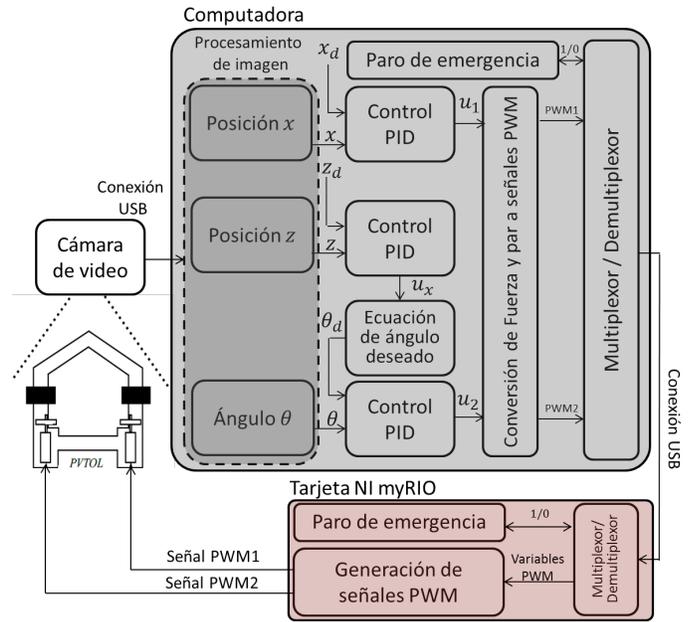


Fig. 7. Esquema de control general con la instrumentación electrónica.

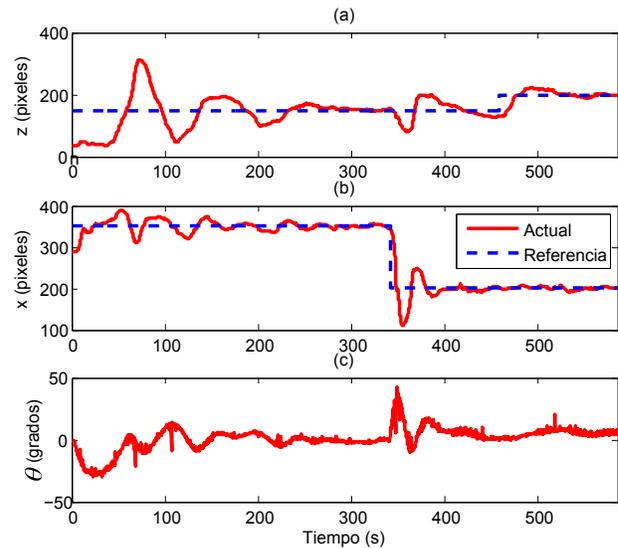


Fig. 8. (a) Posición en el eje z , (b) posición en el eje x , y (c) ángulo rotacional de alabeo θ del prototipo PVTOL.

Cabe mencionar que entre el plano inclinado y el prototipo PVTOL existe una fricción estática y una fricción dinámica las cuales no se toman en cuenta en el modelo matemático del prototipo PVTOL. Las características de robustez ante incertidumbres en el diseño de los controladores PIDs permiten que cumplan sus objetivos de control aún sin considerar las fuerzas de fricción presentes en la plataforma experimental. La presencia de la fuerza de fricción estática se observa al cambiar la referencia de la posición $z - x$ del vehículo PVTOL. La fricción estática es la fuerza que se opone al desplazamiento, es decir, que al cambiar la trayectoria deseada, la acción de control debe aumentar su valor hasta vencer la fuerza de fricción estática.

Como se explicó en la Sección 3, las señales de control aplicadas al prototipo PVTOL son dos señales PWM, las cuales se muestran en la Fig. 9. Se observa que las señales de PWM se saturan en el ciclo útil desde 0 a 1, lo que provoca que la posición $z - x$ y el ángulo rotacional θ tengan una dinámica lenta para llegar a la referencia deseada en el tiempo en que la acción de control se satura; sin embargo, se observa que los controladores PIDs cumplen sus objetivos de seguimiento de trayectoria de manera correcta, aún con la existencia de la saturación en los actuadores. Los resultados experimentales se muestran en el siguiente video: <https://www.youtube.com/watch?v=H-P4Unwdq80>.

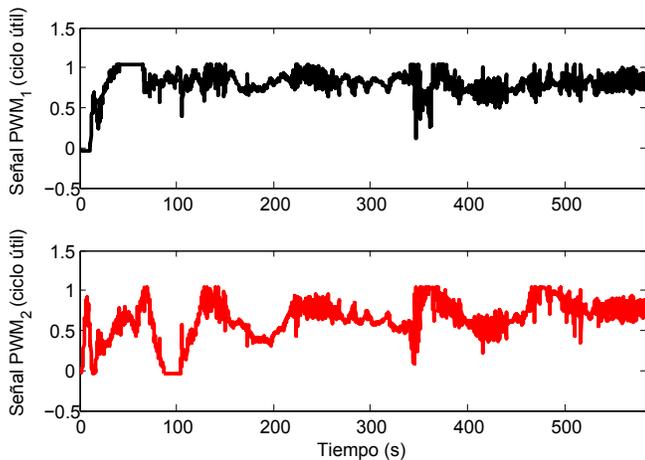


Fig. 9. Señales de control aplicadas al prototipo PVTOL: señales PWM (ciclo útil).

6. CONCLUSIÓN

La principal contribución de este artículo es presentar el diseño y la implementación de un prototipo PVTOL, una plataforma experimental, el diseño y la implementación práctica de un esquema de control jerárquico para seguir la trayectoria de la posición $z - x$ y el ángulo rotacional de alabeo θ del vehículo.

Los resultados experimentales mostraron que las leyes de control generadas con los controladores PIDs cumplieron sus objetivos para el seguimiento de las referencias deseadas, aún ante la presencia de incertidumbres en el modelado, como son las fuerzas de fricción presentes entre el prototipo PVTOL y la plataforma experimental.

Finalmente, la efectividad de los resultados obtenidos utilizando la plataforma experimental para el PVTOL permite concluir que con dicha plataforma es posible probar diferentes estrategias de control de una manera eficiente y sencilla. Como trabajo futuro se pretende probar de forma experimental controladores en cascada y un sistema de detección y aislamiento de fallas en actuadores diseñados con el modelo matemático del PVTOL representado en forma de qLPV, utilizando el prototipo PVTOL y la plataforma experimental presentada en este trabajo.

REFERENCIAS

Derafa L., Benallegue A., and Fridman L. (2012). Super twisting control algorithm for the attitude tracking of

a four rotors UAV. *Journal of the Franklin Institute*, 349(2), 685–699.

Turker T., Gorgun H., and Cansever G. (2012). Stabilization of uncoupled PVTOL aircraft based on a Lyapunov function. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 34(5), 578–584.

Venkatash C., Mehra R., Kazi F., and Singh N. M. (2013). Passivity based controller for underactuated PVTOL system. In *Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), 2013 IEEE International Conference on*, 1–5. Bangalore, India.

Lara D., Panduro M., Romero G., Alcorta E., and Bencourt R. (2014). Robust control design techniques using differential evolution algorithms Applied to the PVTOL. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 20(3), 451–466.

Ortiz J.P., Minchala L.I., and Reinoso M.J. (2016). Non-linear robust H-Infinity PID controller for the multivariable system quadrotor. *IEEE Latin America Transactions*, 14(3), 1176–1183.

Lin F., Zhang W., and Brand R.D. (1999). Robust hovering control of a PVTOL aircraft. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7(3), 343–351.

Aguilar-Ibañez C., Sossa-Azuola H., and Suarez-Castanon M. S. (2015). PVTOL control: a backstepping approach. In *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE), 2015 IEEE International Conference on*, 93–98. Prague, Czech Republic.

Cárdenas R., and Aguilar L. T. (2011). Output feedback sliding mode control of a PVTOL including actuators dynamics. In *IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2011 IEEE International Conference on*, 1482–1486, Denver, CO, USA.

Ortiz-Torres G., López-Estrada F. R., Reyes-Reyes J., García-Beltrán C. D., and Theilliol D. (2016). An actuator fault detection and isolation method design for planar vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle modelled as a qLPV system. In *4th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences (ICONS)*, 49(5), 272–277. Reims, France.

Meinlschmidt T., Aschemann H., Butt S. S., Meinlschmidt E.T., Aschemann H., and De S.B. (2014). Cascaded backstepping control of a duocopter including disturbance compensation by unscented Kalman filtering. In *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 315–320. Metz, France.

Palomino A., Castillo P., Fantoni I., and Lozano R. (2005). Control strategy using vision for the stabilization of an experimental PVTOL aircraft setup. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(5), 487–850.

Kong F., Chen S., and Wang X. (2015). Development of a practical experimental platform for control system of the quadrotor. In *Control and Decision Conference (CCDC), 27th Chinese*, 2503–2508. Qingdao, China.

Schedlinski C., and Link M. (2001). A survey of current inertia parameter identification methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(1), 189–211.

Choi Y. C., and Ahn H. S. (2015). Nonlinear control of quadrotor for point tracking: Actual implementation and experimental tests. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(3), 1179–1192.