

# CONTROL PID DE ALTURA DE UN QUADROTOR

Sergio Andrés Beltrán\*, Omar Lengerke\*\*,  
Hernán González Acuña\*\*\*

Fecha de Recibido:21/04/2011      Fecha de aprobación:29/07/2011

## Resumen

El presente artículo presenta el desarrollo de la identificación con el método de caja negra y el control PID del proceso de elevación (en el eje Y) de un Quadrotor modelo GAUI 330X. El estudio consiste en el desarrollo de un lazo de control de velocidad angular del motor encargado de la elevación. El sensor utilizado para su medición, es un CNZ1120 (como encoder) con su respectivo conversor frecuencia/voltaje. Son aplicados los métodos no paramétrico Eyeball (Smith) y los paramétricos para la identificación del modelo y control a lazo cerrado PID. El estudio realizado garantiza la velocidad deseada en estado estable, como un tiempo de establecimiento corto.

**Palabras clave:** Control, identificación, PID, Quadrotor.

## Abstract

This paper contains the development of the identification with the black box method and PID control of the lifting process (on the Y axis) of a Quadrotor model GAUI 330X. The process involves the developing of the speed control loop within control angular speed of the motor and the sensor used was a CNZ1120 with its respective voltage-frequency converter. It is applied nonparametric methods Eyeball (Smith) and the parameters for model identification and PID closed loop control, the main objective of the research is ensure the desired speed at steady state, as a short settling time and an analysis of how to replicate this driver for each other achieve the lift.

**Keywords:** Control, identification, PID, Quadrotor.

---

\*Ing. Sergio Andrés Beltrán: Ingeniero Mecatrónico.

Correo Electrónico: sbeltran3@unab.edu.co

\*\*Ph.D M.Sc Omar Lengerke: HEAD OF MECHATRONICS AND CONTROL RESEARCH GROUP Mechatronics and Robotics Laboratory editor Colombian Journal of Computation.

Correo Electrónico: olengerke@unab.edu.co

\*\*\*M.Sc Hernan Gonzalez: Docente facultad de Ingeniería Mecatrónica UNAB

Correo Electrónico: hgonzalez3@unab.edu.co

§ Se concede autorización para copiar gratuitamente parte o todo el material publicado en la *Revista Colombiana de Computación* siempre y cuando las copias no sean usadas para fines comerciales, y que se especifique que la copia se realiza con el consentimiento de la *Revista Colombiana de Computación*.

## 1. Introducción

Los Quadrotores son bastante utilizados en la robótica, debido a las funcionalidades de despegue, aterrizaje vertical y vuelo estacionario que se pueden conseguir. Estos vehículos aéreos son utilizados como vehículos autónomos no tripulados (*UAV - Unmanned Aerial Vehicles*); sin embargo, podrían considerarse como potenciales AGV (*Automated Guided Vehicles*) en la automatización de una empresa, así como también, en desastres naturales, búsquedas y rescates, vigilancia, inspección de instalaciones y estructuras, vigilancia y realización de mapas de terrenos.

Hasta hace poco tiempo, desarrollar un vehículo aéreo en escala miniatura y controlado de manera autónoma, era un sueño de muchos investigadores, los cuales estaban limitados por las restricciones impuestas por el hardware hasta entonces existente. Lo que hizo posible la construcción de robots aéreos autónomos, fueron los recientes avances tecnológicos en actuadores y sensores en escala reducida, así como en el almacenamiento de energía y en el procesamiento de datos [1].

El desarrollo de sistemas de control para este tipo de vehículos no es trivial, debido principalmente a la dinámica tan compleja inherente en los sistemas aerodinámicos, los cuales son multivariables, subactuados y además presentan diversas características no lineales. Esto significa que las leyes clásicas de control lineales y mono variables pueden tener muy limitada su cuenca de atracción, provocando inestabilidades cuando se opera en condiciones no muy lejanas a las de equilibrio [2]. Por otra parte, las técnicas desarrolladas para robots totalmente actuados, no se aplican directamente al caso de sistemas mecánicos no lineales subactuados [3].

Para aumentar tanto la fiabilidad como las prestaciones de estos sistemas se suelen requerir estrategias de control avanzadas que permitan tener en cuenta, por una parte, la complejidad de estos sistemas, y por otra, las incertidumbres propias de cualquier modelado. Tales requisitos pueden ser posibles utilizando técnicas de modelado no lineal y de teoría de control no lineal moderna, lo que permite alcanzar un alto desempeño en vuelos autónomos, y en distintas condiciones de vuelo (vuelo estacionario, vuelo en punto fijo, aterrizaje/despegue) [4].

De acuerdo a lo anterior, el presente proyecto incluye el análisis del sensor utilizado y de los principales elementos del quadrotor. Adicionalmente, es presentado el modelo estático por métodos no paramétricos en este caso *eyeball* (Smith), y su contraste con los paramétricos el diseño del controlador PID, y el análisis de acople a cuatro motores.

## 2. Quadrotor

### 2.1 Proyecto Mecatrónico del Quadrotor

La figura 1, permite conceptualizar el proyecto de forma global y comprender que una de las metodologías para realizar este proyecto exitosamente es la Mecatrónica, con una metodología de ingeniería concurrente donde se abarcan diversas disciplinas, cada una de ellas entrelazadas (horizontalmente y verticalmente) entre sí trabajando en equipo simultáneamente, por ello a pesar de que el proyecto no es recomendable estructurar por fases, sí debe seguir una secuencia de pasos para que la investigación tenga un inicio un fin y un sentido, para de esta forma, cumplir los objetivos propuestos en un proyecto mecatrónico [5].

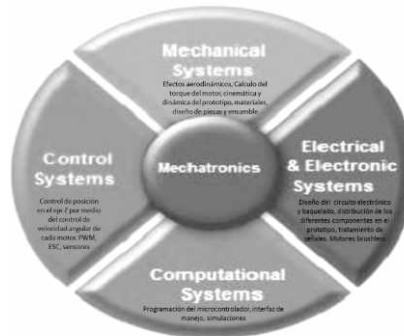


Figura1. Proyecto Mecatrónico del Quadrotor

### 2.2 Sensor óptico CNZ1120

El Sensor óptico reflectivo utilizado en el vehículo aéreo, está integrado por un emisor de luz infrarroja y el receptor infrarrojo. El sensor se encuentra empaquetado en configuración de barreta o tipo U, permitiendo realizar configuraciones para detección (encoders), objetos o posición (Figura 2).



Figura 2. Sensor óptico CNZ1120

## 2.2 LI-PO (baterías de polímero de litio)

El sistema de energía utilizado en el Quadrotor es una variación de las Baterías Litio-Ion (Li-ion, tiene una densidad de energía entre 5 y 12 veces más que las de Ni-Cd o las de Ni-MH). Son baterías más ligeras y no poseen efecto memoria. El voltaje de cada elemento es de 11.1 V a 2200 mA (figura 3). La desventaja de este tipo de baterías, es la necesidad de carga, la cual es más lenta que las de Ni-Mh. Este tipo de baterías son ideales para alimentar motores potentes. Adicionalmente, se debe considerar, que el consumo máximo del motor sea menor que la descarga máxima de la batería, con la finalidad de evitar que su tiempo de vida útil se disminuya considerablemente. Su reducido tamaño y ligereza también las hacen ideales para aeromodelos y helicópteros, incluyendo un cargador estándar Turnigy, que dura en promedio cuatro horas en cargar al máximo la batería.



Figura 3. Baterías LI-PO

## 2.2 Motor brushless

La palabra brushless se puede traducir como "sin escobillas", estos motores carecen de colector y escobillas o carbones y en vez de funcionar en DC funcionan en AC (Figura 4). Las ventajas de los motores Brushless son las siguientes: mayor eficiencia (menos pérdida por calor), mayor rendimiento (mayor duración de las baterías para la misma potencia), menor peso para la misma potencia, requieren menos mantenimiento al no tener escobillas, relación velocidad/par motor es casi una constante, mayor potencia para el mismo tamaño, rango de velocidad elevado al no tener limitación mecánica. Dentro de las desventajas están, mayor costo de construcción, el control es caro y complejo y siempre hace falta un control electrónico para que funcione, que a veces duplica el costo. La tendencia en los sistemas quadrotores, es utilizar los motores brushless, ya que ofrecen mayor rendimiento ante las baterías y mayor potencia [5].



Figura 4. Motor Brushless

### 2.5 Modelo Estático: Lazo Abierto

Se determinó la curva característica de acción de control vs respuesta del sistema, para lo cual es aplicado un valor de tensión entre 2.5V y 5V, que equivalen a una señal de PWM entre 30% y 32% (Tabla 1 y Figura 5).

Control (V)	Velocidad (rpm)
2.6	360
2.8	600
3	840
3.2	1080
3.4	1320
3.6	1560
3.8	1920
4	2280
4.2	2520
4.4	2520
4.6	2640
4.8	2400

Tabla 1. Datos Característicos para la acción de control

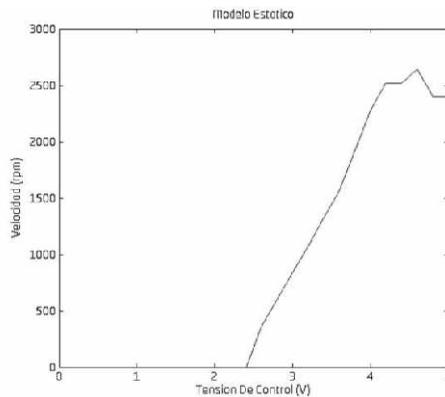


Figura 5. Curva característica

## 2.6 Método del eye-ball

### 2.6.1 Tiempo de muestreo

El periodo de muestreo seleccionado para la identificación es de 125 ms, debido a que el sistema se estabiliza rápidamente y el tiempo de envío del sensor, es de 6 microsegundos. En caso de hacerlo más lento, el sistema tiende a no responder establemente y más rápido, a altas velocidades no se alcanza a contar fácilmente los pulsos. En la figura 6, es utilizado un muestreo de 125ms y una entrada escalón de 2 Voltios.

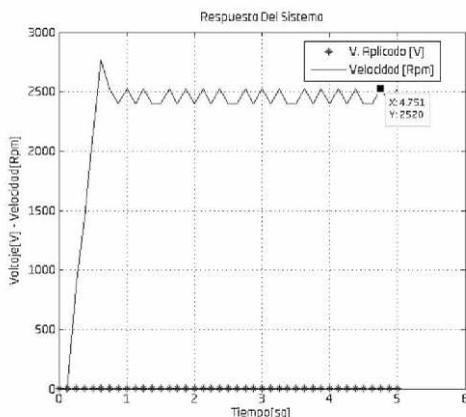


Figura 6. Respuesta del sistema ante una entrada escalón de 2V.

## 2.7 Método de Smith – sobrepaso

Es utilizado el método de *Smith*, debido a que el sistema presenta un sobrepaso, sistema subamortiguado. A continuación son presentados los resultados de este proceso, donde se observa la respuesta teórica y experimental del sistema ante una entrada escalón de 2V (Figura 7).

### 2.7.1 Programa realizado en matlab ©

```

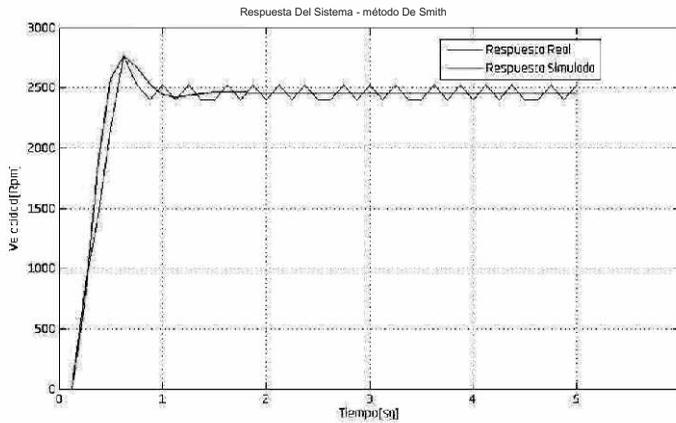
s = tf('s')
Yss = 2460;
Uss = 4;
Ym = 2760;
Kp = Yss/Uss;
M = (Ym-Yss)/Yss;
Gama = abs(log(M))/sqrt(pi^2 + (log(M))^2);
Td = 0.125;

```

$$\begin{aligned} \tau &= 0.626 - T_d; \\ \omega_n &= \pi / (\tau \cdot \sqrt{1 - \gamma^2}); \\ G &= (K_p \cdot \exp(-T_d \cdot s) \cdot (\omega_n^2)) / ((s^2) + (2 \cdot \gamma \cdot \omega_n \cdot s) + (\omega_n^2)); \end{aligned}$$

La función de transferencia encontrada, está dada por la ecuación (1).

$$S = \exp(-0.125 \cdot s) \cdot \frac{3.503 \cdot 10^4}{s^2 + 8.4 s + 56.96} \quad (1)$$



**Figura 7.** Respuesta teórica y experimental del sistema ante una entrada escalón de 2V.

### 2.7.2 BESFIT

$$BestFit = 100 \left( 1 - \frac{norm(y_h - y)}{norm(y - \bar{y})} \right)$$

Donde,  $y$  son los datos experimentales de la tensión del taco generador a una cuerda  $u(t)$ ,  $y_h$ , la respuesta del modelo matemático a una entrada  $u(t)$  y  $\bar{y}$  es el promedio de los datos experimentales de la tensión del taco generador a una entrada  $u(t)$ . Aplicando el método de Smith para la identificación del sistema es obtenido un BestFit del 80.8423%, el cual es un porcentaje óptimo para el sistema.

## 2.8 Modelo paramétrico

### 2.8.1 PRBS

Son tomadas dos señales PRBS que se encuentran en el rango de comportamiento lineal del sistema, las cuales son observadas en las figuras 8, figura 9, figura 10 y figura 11, con las siguientes características: Voltaje Mínimo = 0V y Voltaje Máximo = 2V.

#### PRBS 1 – Señal de identificación del sistema

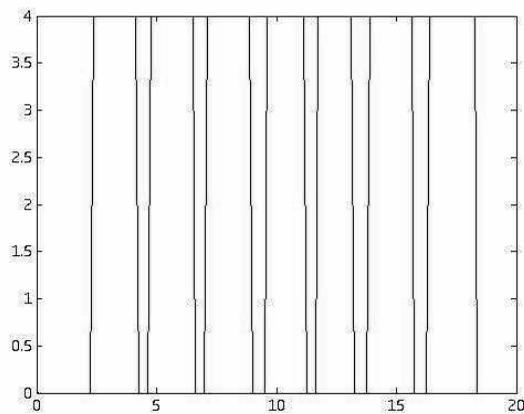


Figura 8. Voltaje De Entrada – Señal PRBS – 1 2V

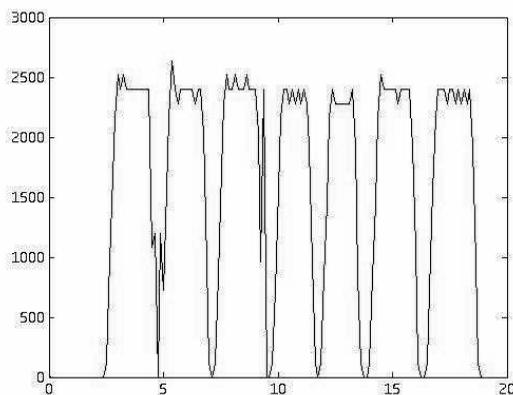
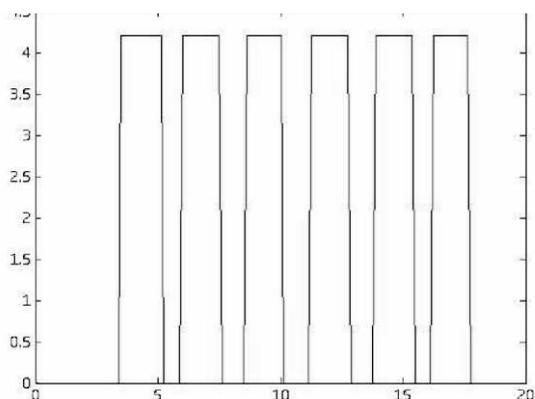
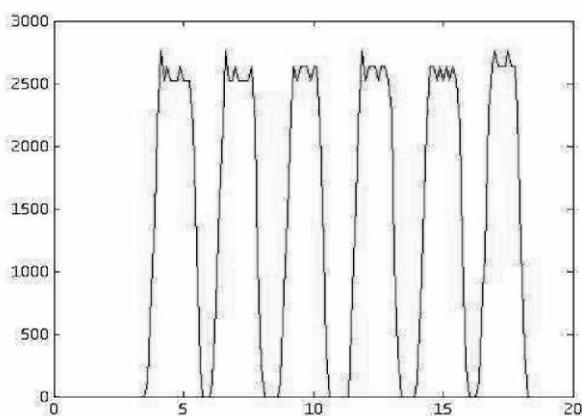


Figura 9. Voltaje De Salida – Señal PRBS – 1

**PRBS 2 – Señal de validación del sistema.****Figura 10.** Voltaje De Entrada – Señal PRBS – 2 4,3V**Figura 11.** Voltaje De Salida – Señal PRBS – 1 4V

Para este caso son realizados cuatro modelos paramétricos, los cuales son el ARX, BJ, ARMAX y el OE, donde son analizadas algunas características, como: la respuesta ante una entrada escalón, la comparación de los datos simulados con los teóricos y su respectivo BestFit, el cual encamina a la conclusión, de que el mejor modelo que se adapta al sistema modelado, es el BJ. A continuación son observados los resultados de este modelo (figura 12, figura 13 y figura 14).

### 2.8.2 Modelo BJ

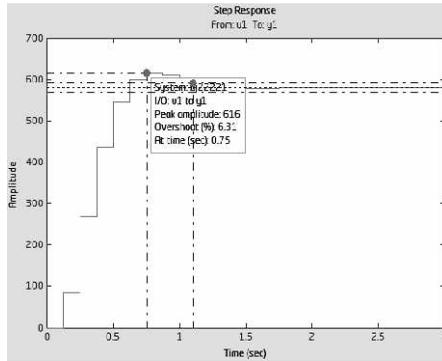


Figura12. Respuesta a una entrada escalón. Tiempo de establecimiento = 1.1sg

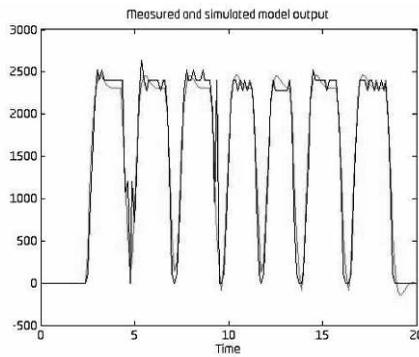


Figura 13. Comparación entre los datos simulados y experimentales.  
BestFit: 78.86 %

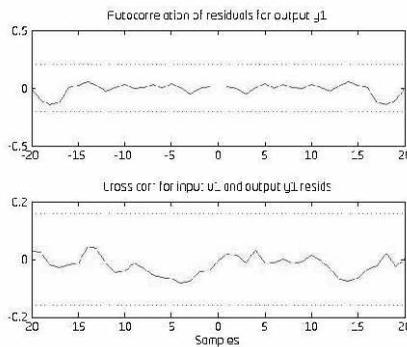


Figura 14. Correlación entre la entrada y los residuales - Blancura de los residuales.

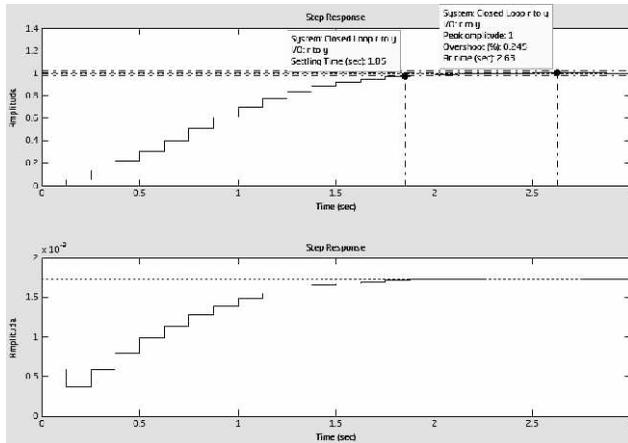
En los modelos paramétricos aplicados, se obtiene el mismo tiempo de establecimiento para la respuesta del sistema, sin embargo, el modelo BJ a diferencia de los otros, obtiene el sobrepaso más bajo con 6.06%, no muy distante que los obtenidos por las otras respuestas, y también es el que obtiene un buen BestFit: 78.86%, La planta generada por este, es observada en la ecuación (2).

$$G = \frac{(89.88*z + 82.14)}{(Z^2 - 1.111*z + 0.4077)} \quad (2)$$

## 2.9 Controlador PID

A partir del modelo definido anteriormente (modelo BJ), se realiza el diseño del regulador PID por medio de la herramienta *rltool* del software Matlab ©. Este controlador es implementado por medio del software Labview©, donde son analizados y comparados los resultados de la simulación, con los teóricos, al aplicar una entrada escalón.

A continuación, son observadas la simulación realizada en matlab©, donde son obtenidas las ganancias respectivas para el análisis del controlador PID y la comparación de los resultados teóricos con los experimentales.



$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_1 z^2 - K_2 z + K_3}{z(z-1)}$$

Pid = (0.00058761\*(z^2 - 1.317\*z + 0.752))/(z\*(z-1));  
 K1 = 0.0058761  
 K2 = 0.001317  
 K3 = 0.0000000000752

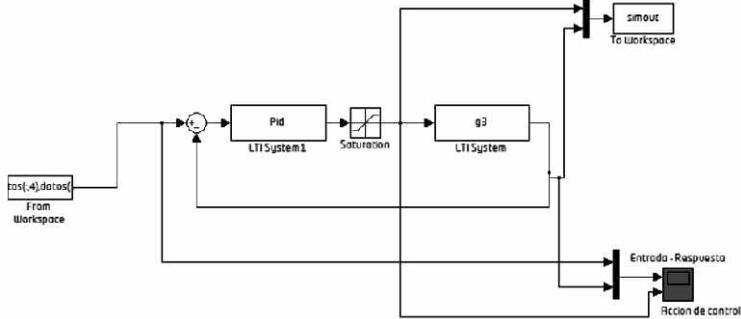


Figura 15. Diagrama De Bloques - PID

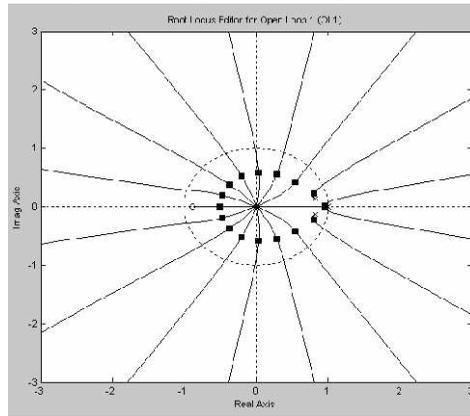


Figura 16. Respuesta Teórica – 2000 rpm

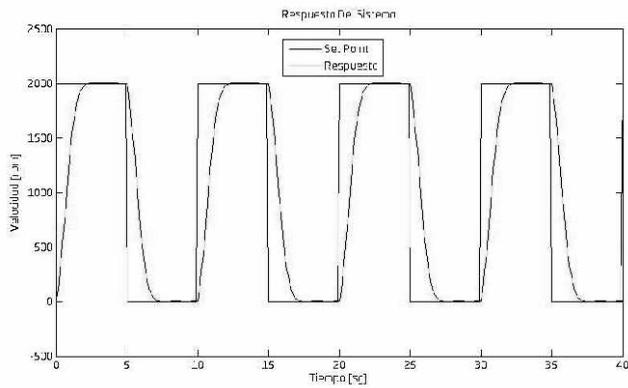
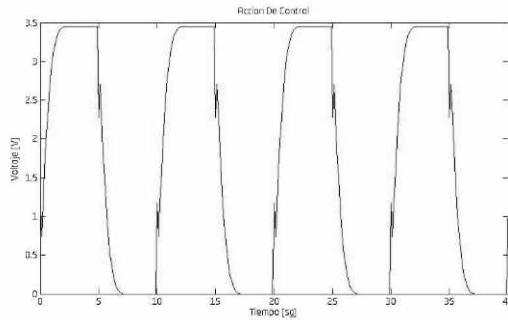


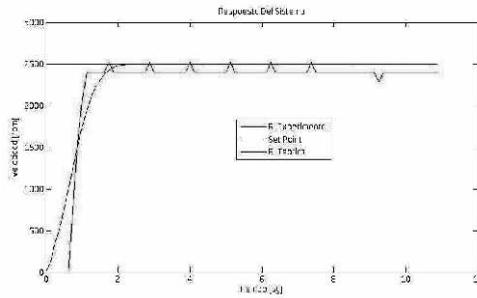
Figura 17. Acción De Control Teórica



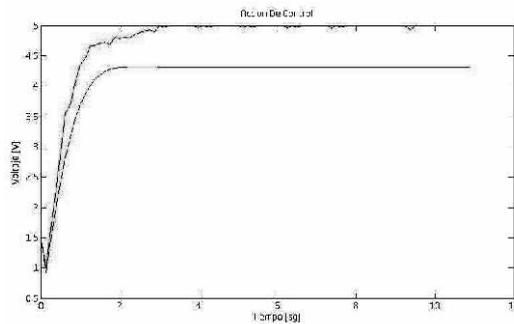
**Figura 18.** Acción de control

A continuación se observa la respuesta transitoria del sistema y la acción de control ante una entrada escalón y ante una entrada de *setpoint* variable, comparando la respuesta teórica con la experimental.

### 2.9.1 Entrada Escalón

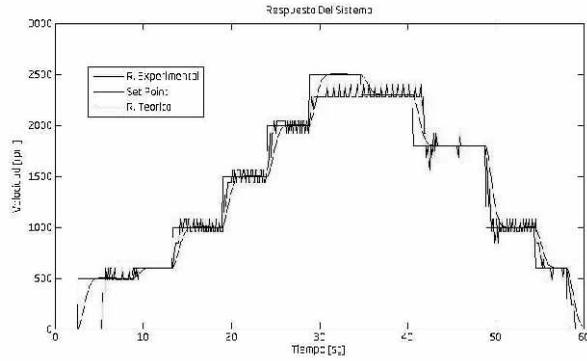


**Figura 19.** Respuesta Del Sistema – Entrada Escalón 2300 rpm

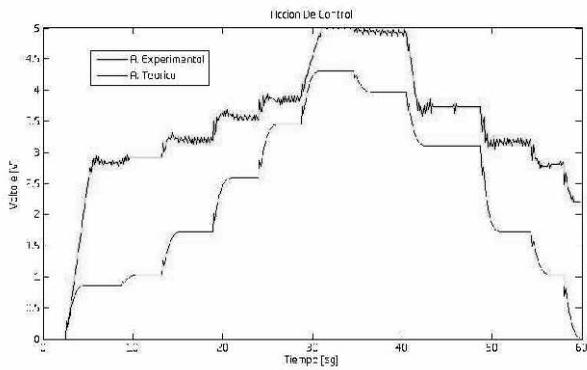


**Figura 20.** Acción De Control – PID

## 2.9.2 Setpoint variable



**Figura 21.** Respuesta Del Sistema Con Set Point Variable – PID



**Figura 22.** Acción De Control Con Set Point Variable – PID

El sistema responde adecuadamente ante una entrada escalón y una entrada con *setpoint* variable, implementando el controlador PID, con características de un segundo para el tiempo de establecimiento, sin ningún sobrepaso y una buena respuesta de la acción de control.

## 3. Conclusiones

Aunque el controlador PID puede ser implementado fácilmente, existe la posibilidad de que la ganancia produzca en el sistema una acción de

control, suficientemente robusta como para superar los niveles físicamente limitados por el quadrotor. Además de esto, tiene la peculiaridad de no alcanzar el *setpoint* deseado algunas veces, debido a que la planta no es lineal y el integrador es muy bajo. Finalmente, existe un valor de ganancia que hace que el sistema se vuelva inestable, denominada la ganancia crítica, donde el motor se sale del comportamiento lineal, por eso la no linealidad del sistema, podría ser resuelta implementando controladores *Fuzzy* consultados en la mayoría de investigación en quadrotoros.

Es seleccionada la planta obtenida a partir de modelos paramétricos, dado que a pesar que con *eyeball* se obtuvo mejor besfit este método generalmente funciona mejor con plantas lentas y los métodos paramétricos ofrecen mejores prestaciones en general. Por último, existen diversos métodos para sintonizar controladores PID, simplemente para el caso práctico, se utilizó la sintonización a través de los errores. Cabe destacar que el controlador que proporciona la herramienta computacional utilizada, debe contar con un integrador que permita al sistema alcanzar el *setpoint* y en este caso fue muy bajo. Se deben ajustar los valores de tal manera que el controlador no presente cambios significativos en la acción de control y continuamente.

## 4. Referencias

- [1] E. Altug, J. P. Ostrowski, y R. Mahony. Control of a Quadrotor Helicopter Using VisualFeedback. In Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics andAutomation, pages 72–77, Washington, DC, 2002.
- [2] S. Bouabdallah y R. Siegwart. Backstepping and Sliding-mode Techniques Applied toan Indoor Micro Quadrotor. In Proc. IEEE Int. Conf. on Robot. and Automat., pages2259–2264, Barcelona, Spain, 2005.
- [3] S. Bouabdallah, P. Murrieri, y R. Siegwart. Design and Control of an Indoor MicroQuadrotor. In Proc. IEEE Int. Conf. on Rob. and Automat., volume 5, pages 4393–4398, New Orleans, USA, 2004.
- [4] S. Bouabdallah, A.~ Noth, y R. Siegwart. PID vs LQ Control Techniques Applied toanIndoor Micro Quadrotor. In Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, volume 3, pages 2451–2456, Sendai, Japan, 2004.

- [5] O. Lengerke,, M.S. Dutra, “Mechatronics Education - Synergistic Integration of New Paradigm for Engineering Education”, In: VI National congress of Mechanical Engineering – CONEM 2010, Brazil, 2010.
- [6] T. Madani and A. Benallegue, “Backstepping Sliding Mode Control Applied to a Miniature Quadrotor Flying Robot”, Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles.