

Diseño, construcción y control manual y autónomo de un vehículo aéreo no tripulado

Design, construction and manually or autonomously control of an unmanned aerial vehicle

Marcos Sagrera¹, Vicente Tuyare², Gustavo Compagnone³, Rafael Sotelo⁴

Recibido: Agosto 2015

Aceptado: Setiembre 2015

Resumen.- La era de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) exclusivamente para fines militares ya es historia. Hoy en día las principales empresas tecnológicas están poniendo especial énfasis en este sector, reconociendo el gran impacto que puede tener en la sociedad. El objetivo del proyecto de fin de carrera descrito en este artículo es el ser capaces de construir uno de estos vehículos desde las bases. Incluyendo la selección de los materiales a emplear, el estudio de la dinámica del sólido construido y el diseño de los algoritmos de control. Esto permite tener un conocimiento sólido sobre su funcionamiento y permitirá, a futuro, realizar una infinidad de aplicaciones con una plataforma de la cual se tiene un dominio completo.

Palabras claves: Vehículos aéreos no tripulados; control; autónomo; electrónica.

Summary.- *The era of the unmanned aerial vehicles (UAV) or drones exclusively for military purposes is history. Today special emphasis is being held by the major technology companies on this sector, recognizing the huge impact it can have on society. The motivation of this final year project was to being able to build one of these vehicles from scratch. Taking into consideration the selection the components to be used, the study of UAV's dynamics and the design of the control algorithms. The knowledge acquired will enable us to work in future projects with a platform completely dominated.*

Keywords: *Unmanned aerial vehicles; control; autonomous; electronics.*

1. Introducción.- El tipo de VANT que se diseñará, construirá y controlará en este proyecto será un cuadirrotor, quadrotor o cuadricóptero.

El objetivo del proyecto es poder realizar un cuadirrotor con control manual que permita realizar vuelos con mucha fidelidad y automáticamente mantenga una altura y posición determinada.

El dispositivo deberá presentar las siguientes funcionalidades en un entorno abierto (con condiciones de viento menores a 5 nudos) y cerrado:

- 1) Tener una comunicación entre el VANT y el usuario fiable de hasta 10m. Esta última permitirá al VANT recibir instrucciones para tomar distintas acciones.
- 2) Estabilidad en sus tres ángulos de navegación admitiendo un error de 4°.

1Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo, Montevideo, Uruguay, msagrera@correo.um.edu.uy

2Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo, Montevideo, Uruguay, vtuyare@correo.um.edu.uy

3Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo, Montevideo, Uruguay, gcompagnone@correo.um.edu.uy

4Facultad de Ingeniería. Universidad de Montevideo, Montevideo, Uruguay, rsotelo@um.edu.uy

- 3) Mantenimiento de una altura objetivo, menor a $3m$, con un error menor a $20cm$ para alturas menores a $2m$ y menor a $30cm$ para alturas menores a $3m$.
- 4) Realizar cambios de altura en forma automática en base a una nueva altura objetivo que el usuario envíe.
- 5) Realizar un despegue automático desde el nivel del piso en forma controlada.
- 6) Realizar un aterrizaje automático desde cualquier altura, menor a $3m$, en forma controlada.
- 7) Realizar movimientos, según los ejes del VANT, en base a la información que el usuario envíe.
- 8) Tener una funcionalidad de seguridad que, en caso de perder la comunicación o que exista alguna falla en los sensores, realice un aterrizaje de forma segura.

Adicionalmente, en un entorno abierto, el VANT tendrá la siguiente funcionalidad:

- 9) Mantenimiento de la posición en forma autónoma dentro de un área de $25m^2$.

2. Descripción del Prototipo Implementado.- En la Figura VII se describen los agentes que intervienen en el funcionamiento del sistema.

El usuario, a través de una computadora, ejecuta comandos que son recibidos por el VANT por medio de una comunicación inalámbrica para accionar algunas de las funcionalidades del dispositivo mencionadas anteriormente.

Los satélites GPS y las ondas de ultrasonido enviadas permiten realizar los controles de posición y de altura respectivamente.

Finalmente, en el centro del dispositivo se encuentran los sensores que permiten su estabilización y la unidad central de procesamiento (del inglés *central processing unit* o CPU) que fue desarrollada.

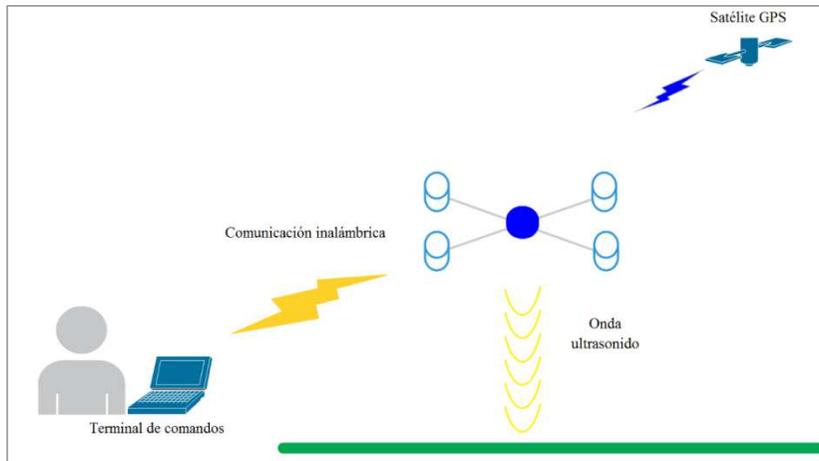


Figura VII.- Interacción del sistema con el ambiente

La Figura VIII presenta el producto final diseñado y construido.



Figura VIII.- Diseño y construcción final del cuadricóptero.

Los elementos que conforman al sistema pueden clasificarse en dos grandes categorías:

- Los responsables de realizar un vuelo y enviar la información al usuario. Se encuentran: la estructura, los motores, los variadores de velocidad de los motores (del inglés *electronic speed controller* o ESC), hélices, CPU, batería y comunicación inalámbrica.
- Los sensores que permiten que el vuelo sea controlado en su inclinación y orientación (*Inertial Measurement Unit* o IMU), altura (sensores de ultrasonido) y posición (receptor GPS) en forma autónoma.

A continuación, las Figuras III, IV y V presentan la ubicación final de los distintos componentes en el cuadrirrotor construido con sus respectivas Tablas I, II y III describiendo los modelos utilizados. La información detallada de cada componente y todo el detalle del proyecto realizado en forma práctica y teórica se encuentran en [1].

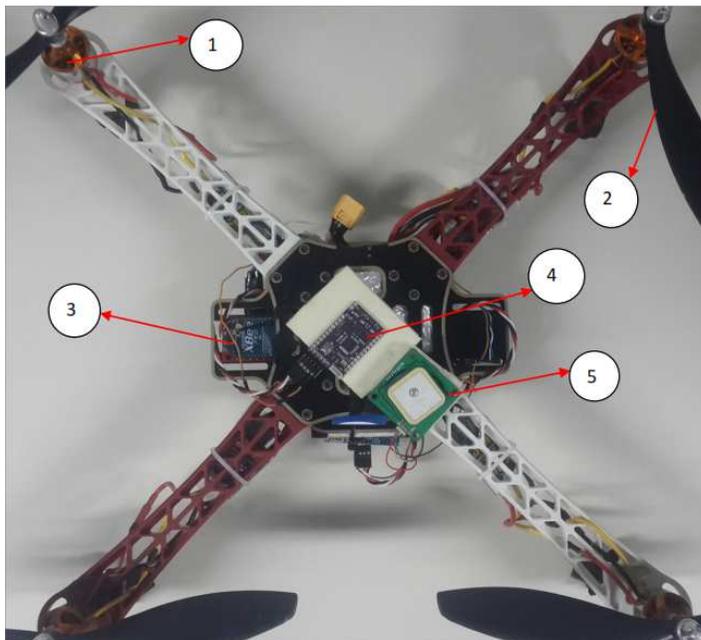


Figura IX.- Vista superior del cuadrirrotor.

Número	1	2	3	4	5
Nombre	MotorTurnigy D2830-11 1000kv Brushless	Hélice 10x4.5	Dispositivo XBee PRO S1	IMUArduIMU V3	Receptor GPS LEA-6H

Tabla III.- Detalle de numeración de la Figura IX.

La elección y compra de componentes estuvo influenciada por los proyectos de código abierto de cuadricópteros: “ArduCopter”[2], “MultiWii”[3] y “AeroQuad”[4]. Se buscó en todo momento que los componentes cumplan con las especificaciones que requería el proyecto, tengan documentación completa sobre su funcionamiento y que hayan sido chequeados eficazmente en dichos proyectos en forma exitosa.

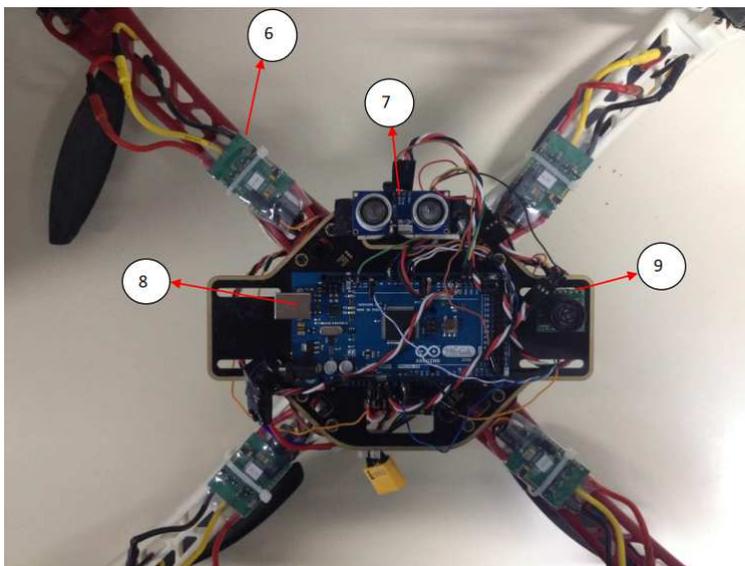


Figura X.- Vista inferior del cuadrirrotor.

Número	6	7	8	9
Nombre	ESC Afro ESC 30Amp (SimonK Firmware)	Sensor de distancia para alturas bajas: HC-SR04	Arduino MEGA 2560	Sensor de distancia para alturas altas: LV-MaxSonar-EZ1

Tabla IV.- Detalle de numeración de la Figura X.

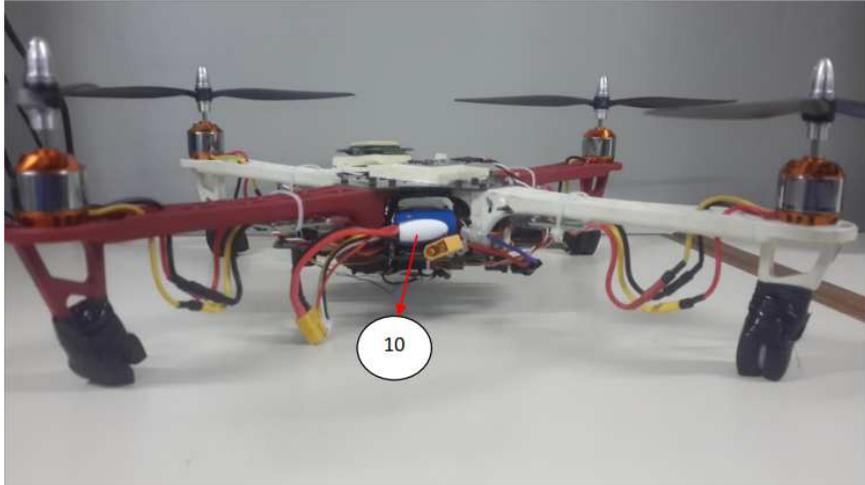


Figura XI.- Vista lateral del cuadrirrotor.

Número	10
Nombre	Batería "Turnigy":1800mAh, 3 celdas de 3.7V y 30C de tasa de descarga máxima

Tabla V.- Detalle de numeración de la Figura XI.

3. Dinámica y Control.- El modelado del movimiento de un sistema rígido requiere el uso de dos sistemas de coordenadas: un sistema inercial (I, J, K) y un sistema de coordenadas móvil (fijo respecto del cuerpo) (i, j, k).

Para definir la posición del cuadrirrotor se definen seis cantidades como lo muestra la Figura VI:

- Tres coordenadas que ubican el centro de masa: $r' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ respecto del sistema inercial.
- Tres ángulos independientes que den la orientación del sistema respecto del sistema inercial:

$$\alpha = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \text{ también denominados Roll, Pitch y Yaw respectivamente.}$$

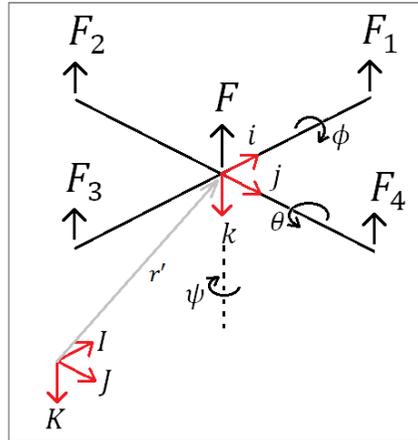


Figura XII.- Sistema inercial y fijo del cuadricóptero.

Estudiar la dinámica de un rígido implica determinar la posición y orientación del cuadricóptero respecto de un sistema de coordenadas de referencia inercial.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las ecuaciones de movimiento de la orientación (1) y posición (2) del sistema modelado [5-9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{lK}{I_{x_i x_i}} (\omega_2^2 - \omega_4^2) - \frac{(I_{z_z} - I_{y_j y_j})}{I_{x_i x_i}} \dot{\theta} \dot{\psi} \\ \ddot{\theta} = \frac{lK}{I_{y_j y_j}} (\omega_1^2 - \omega_3^2) - \frac{(I_{x_i x_i} - I_{z_k z_k})}{I_{y_j y_j}} \dot{\psi} \dot{\phi} \\ \ddot{\psi} = \frac{b}{I_{z_k z_k}} (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) - \frac{(I_{y_j y_j} - I_{x_i x_i})}{I_{z_k z_k}} \dot{\phi} \dot{\theta} \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} = -\frac{K}{m} (\cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi)) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \ddot{y} = -\frac{K}{m} (\cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi)) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \ddot{z} = g - \frac{K}{m} (\cos(\phi) \cos(\theta)) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{array} \right. \quad (2)$$

Donde:

- l es el largo del brazo del cuadricóptero.
- ω_i es la velocidad de giro de cada motor.
- $I_{x_i x_i}$, $I_{y_j y_j}$ y I_{z_z} son los componentes del tensor de inercia.
- K se denomina factor de empuje.
- b es el factor de arrastre.
- m es la masa total del sistema.

En lo que respecta a la estabilización del cuadricóptero en forma autónoma fueron implementados los siguientes controles:

- Control proporcional, integral, derivativo (PID) en la orientación e inclinación del sistema.
- Control PID para el mantenimiento de una altura determinada en todo momento.
- Control PID para variar la velocidad vertical del cuadrirrotor.

Finalmente, para la elección de las constantes a utilizar se procedió de la siguiente manera [10]:

- En primera instancia, hallar el orden de las mismas mediante un modelo simplificado de sistema de una entrada y una salida (sistema SISO) con función de transferencia $G(s)$ al que se le agrega un control Proporcional-Derivativo (PD). Esto fue posible luego de realizar el estudio teórico de la dinámica del cuadrirrotor.
- Finalmente, hacer ajustes hasta llegar, de forma práctica, a una estabilidad acorde a lo especificado en el alcance del proyecto, con el agregado de un término integral.

4. Diagrama de Flujo del Programa de Control.- A continuación, la Figura XIII presenta el flujo de código desarrollado para cumplir con los requerimientos de las funcionalidades del proyecto.

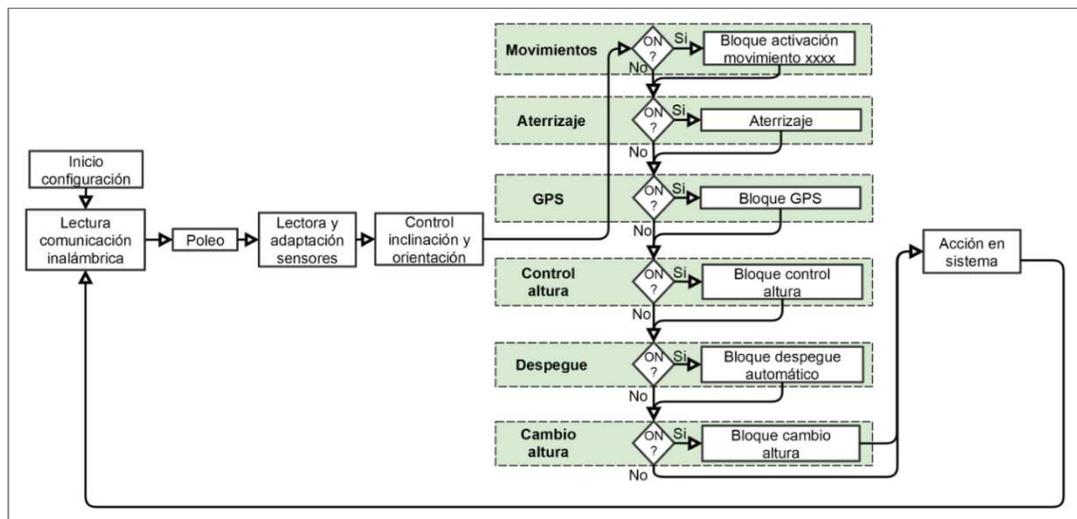


Figura XIII.- Bloque general funcionamiento código

Como se puede observar, la primera vez que se enciende la plataforma, se realiza el inicio de las variables del sistema e inicialización de la configuración de todos los sensores (función *setup()*).

A continuación, comienza el bucle del código (función *loop()*), el cual, con excepción de la comunicación inalámbrica, se ejecuta con una frecuencia de 50Hz:

- Lectura comunicación inalámbrica: modela el momento en que el CPU realiza una lectura en el puerto serial de comunicación inalámbrica con el usuario para recibir y actuar en base a los comandos recibidos.
- Poleo: término que en computación que significa “consulta constante” al sistema. En caso de estar activado, realiza los chequeos que permiten analizar si hubo una falla en la comunicación inalámbrica.
- Lectura y adaptación sensores: modela la lectura por parte del CPU de los valores brindados por los sensores del sistema y su correspondiente adaptación para tener datos más robustos (ej. Filtros complementarios).
- Control inclinación y orientación: realiza todo el cálculo del control relacionado a la estabilidad del sistema en sus tres ángulos de Euler.

- e) Movimientos: en caso de activarse como consecuencia de una acción recibida por el usuario o a raíz del control de posición por GPS realiza el movimiento solicitado (las "xxxx" del cuadro de texto refieren a los cuatro movimientos en un plano horizontal que puede realizar el VANT).
- f) Aterrizaje: bloque que, en caso de estar activado, realizará un aterrizaje en forma automática.
- g) GPS: modela el bloque de código que realiza la acción del control de posición.
- h) Control altura: este bloque es el encargado de realizar el control correspondiente para mantener el VANT a una altura determinada.
- i) Despegue: el código modelado por este bloque, es el encargado de realizar el despegue del cuadrirrotor.
- j) Cambio altura: modela el bloque de código encargado de realizar el cambio de altura cuando es activado.
- k) Acción sistema: modela el envío de la información al sistema (ESC, motores y hélices) para que el VANT realice las acciones, producto del control o del usuario, en base a los cambios de velocidades en cada motor.

5. Resultados obtenidos.- Esta sección presenta los resultados obtenidos en todos los controles implementados del cuadrirrotor.

5.1. Control de altura.- Los resultados de este control se presentan mediante gráficas que contienen en su ordenada, la altura en metros del dispositivo, y en su abscisa, las muestras graficadas que aumentan con el transcurso del tiempo de la prueba.

Fueron realizadas dos pruebas para corroborar el correcto funcionamiento del control de altura del sistema. La primera se realizó en un ambiente cerrado y el objetivo fue presentar el comportamiento del sistema ante sucesivos cambios de altura realizados en forma automática.

La Figura XIV presenta dichos cambios y se puede observar que los errores son menores a 20cm en cada cambio de altura realizado. Dicho error se encuentra dentro de los márgenes de error especificados por los requerimientos del proyecto.

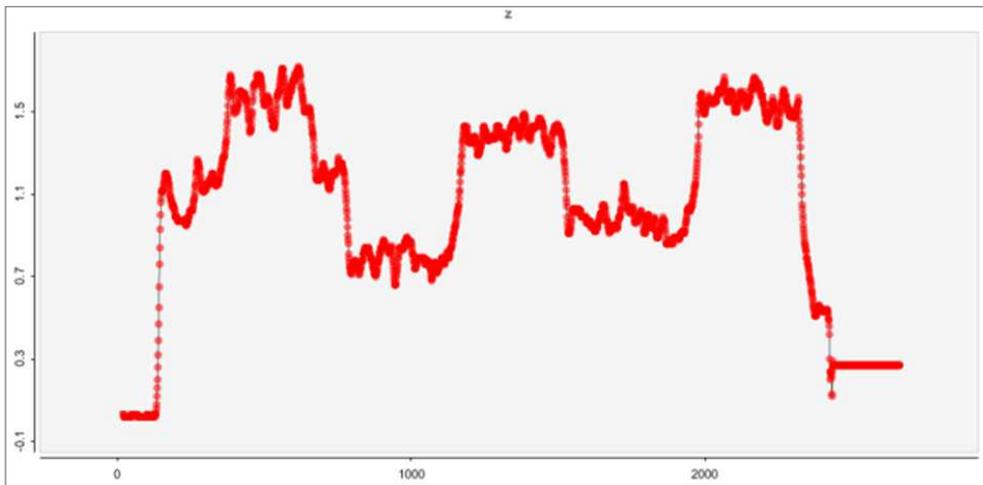


Figura XIV.- Prueba en ambiente cerrado del control y sucesivos cambios de altura.

Finalmente, se realizó una segunda prueba, en un entorno abierto, cuyo objetivo era mostrar el comportamiento del VANT a una altura alta. Por lo tanto, durante la prueba se envió el comando al

VANT de subir a 2.5m en forma automática. Como se puede observar en la Figura XV, el sistema alcanza la altura solicitada y el error presente, aproximadamente menor a 25cm, cumple con los objetivos planteados en el alcance del proyecto.

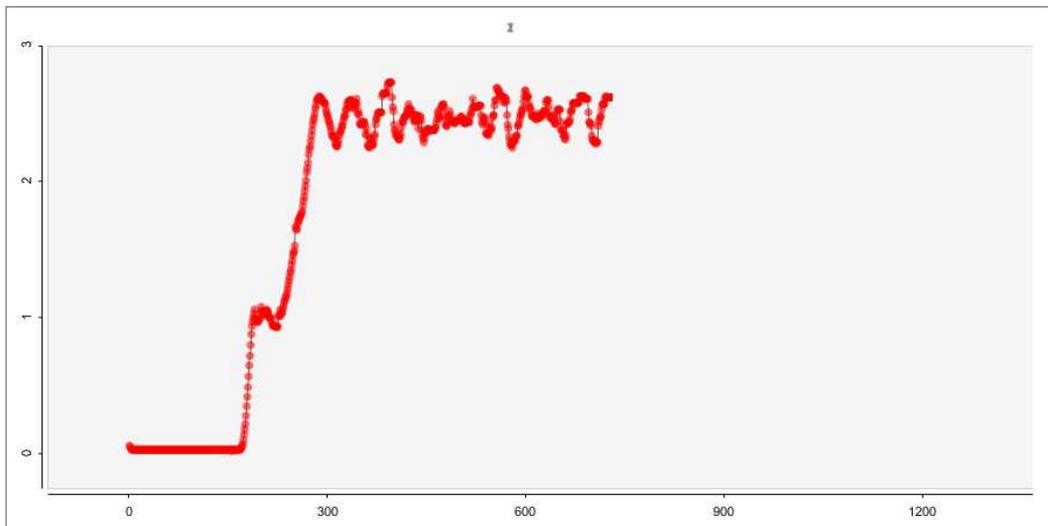


Figura XV.- Prueba entorno abierto con control de altura a 2.5m.

5.2. Control de inclinación y orientación.- En forma paralela con el control de altura, se iteró en los controles de los ángulos, obteniéndose resultados considerados satisfactorios. Se obtuvo una estabilidad en los ángulos objetivos con un error menor a 3°.

5.3. Control de movimientos manuales.- La siguiente prueba consistió en realizar movimientos manuales en el cuadrirrotor a través de los comandos de movimientos que son enviados a la placa por la comunicación serial. Los resultados de estas pruebas, cumplieron con el objetivo de realizar desplazamientos en forma satisfactoria.

5.4. Control de posición.- El control de posición, involucrando al sensor GPS, fue realizado en un entorno abierto para que pueda existir la necesaria línea de vista con los satélites. Se diseñó una prueba en la que se activó el control de GPS antes que levante vuelo el quadrotor. Se pudo constatar que cuando el dispositivo tiende a alejarse más de 1m en la latitud o longitud vuelve a la posición original, producto del control implementado.

6. Conclusiones.- La ejecución del proyecto cumplió con las metas que se habían planteado en un principio: el diseño y construcción de un VANT y el desarrollo del control de la aeronave en forma manual y automática. Específicamente, se desarrollaron las siguientes funcionalidades en el cuadrirrotor para un vuelo en un ambiente cerrado y abierto:

- Estabilización en los ángulos de inclinación y orientación con un error menor a 3° mediante tres controladores PID. El resultado obtenido permite apreciar visualmente un control óptimo en la inclinación y orientación del cuadrirrotor durante todo el vuelo.
- Control de la distancia al suelo. Cualquier altura mayor a 0,4m y menor a 3m es conservada por el quadrotor durante todo el vuelo con un error menor a 20cm y 30cm para alturas menores a 2m y 3m respectivamente. Para realizar este control se utilizaron dos sensores de ultrasonido y la aceleración vertical brindada por el acelerómetro de la IMU. El control consistió en un controlador PID en el cual se estimaron, mediante dos filtros complementarios, la altura y velocidad vertical del cuadrirrotor.

- Ascensos o descensos dentro del rango de alturas mencionadas en el punto anterior de forma controlada. Se desarrolló un control de velocidad vertical que permite finalizar el ascenso o descenso con velocidad nula. Esto permite que no existan grandes sobreelongaciones durante los cambios de altura como se pudo observar en los resultados.
- Movimientos manuales según sus cuatro ejes mediante una señal de entrada en forma de rampa para evitar los cambios bruscos en el control de inclinación.
- Despegue y aterrizaje.
- Seguridad ante posibles fallas de comunicación inalámbrica con el usuario o de intercambio de información con la IMU. Cuando se detectan uno de estos inconvenientes el cuadricóptero realiza un aterrizaje de emergencia controlado automáticamente.
- Comunicación inalámbrica bidireccional con un ordenador. La misma permite, al usuario enviar comandos al VANT de forma que realice las funcionalidades implementadas, y al cuadrirrotor enviar información de vuelo al usuario que se la haya programado previamente.

Finalmente, en un entorno abierto se logró implementar un control de posición del VANT con un error menor a los $9m^2$ utilizando un control ON-OFF.

Es importante mencionar que las pruebas en un entorno abierto, realizadas en forma exitosa, se llevaron a cabo con condiciones de viento menores a 5 nudos. Para un futuro trabajo, sería interesante analizar el impacto de velocidades de viento mayores en las distintas funcionalidades del dispositivo y estudiar los ajustes que habría que efectuar para su correcto funcionamiento.

Durante el transcurso del proyecto se afrontaron una gran variedad de imponderables que hicieron que el cronograma, inicialmente planificado, se viera modificado. Algunos de ellos fueron:

- La dificultad de llevar a la práctica los controladores PID en todos los controles implementados.
- La integración de los dos sensores de ultrasonido para poder alcanzar alturas de hasta $3m$.
- Rotura y cambio de componentes del cuadrirrotor. En particular los motores y hélices que debieron ser reemplazados ante las roturas que sufrían durante las pruebas.

Sin perjuicio de lo mencionado, en vista de los resultados finales obtenidos, se considera haber cumplido con todos los requisitos del funcionamiento del vehículo previamente establecidos.

Este proyecto sienta las bases para en un futuro poder desarrollar aplicaciones sobre la aeronave con énfasis en el procesamiento de imágenes o de realización de trayectorias en forma autónoma.

En otro orden, el desarrollo teórico presentado permitirá, a quien se interese en la temática, tener un marco de referencia sobre el cual basarse a la hora de llevar a cabo su proyecto en áreas de aeromodelismo, robótica o control.

En suma, se logró desarrollar, programar, documentar y construir un dispositivo volador con un control del que se tiene un excelente dominio y cuyo futuro es muy prometedor.

Los autores quedan a disposición de los interesados, así como el prototipo construido, el software de control y una detallada documentación.

7. Referencias

- [1] M. Sagrera and V. Tuyaré "Diseño, construcción y control manual y autónomo de un vehículo aéreo no tripulado," Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Montevideo, 2015.
- [2] *Proyecto código abierto ArduCopter* [Online]. Available: <http://copter.ardupilot.com/>
- [3] *Proyecto código abierto MultiWii* [Online]. Available: <http://www.multiwii.com/>
- [4] *Proyecto código abierto AeroQuad* [Online]. Available: <http://aeroquad.com/>

- [5] H. Voos, "Nonlinear control of a quadrotor micro-UAV using feedback-linearization," in *Mechatronics*, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1-6, 14-17 April 2009.
- [6] R. W. Beard. (2008, Oct. 3). *Quadrotor dynamics and control* [Online]. Available: <http://rwbclasses.groups.et.byu.net/lib/exe/fetch.php?media=quadrotor:beardsquadrotornotes.pdf>
- [7] M. T. Mason. (2010). *Lecture 24. Rigid body dynamics* [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/16741-s07/www/oldlecture21.pdf>
- [8] G. V. Raffo "Modelado y Control de un Helicóptero Quad-Rotor ," M.S. thesis, Dept. Ing. Sistemas y Automática, Univ. de Sevilla, Sevilla, Spain, 2007.
- [9] J. M. B. Domingues "Quadrotor prototype, " M.S. dissertation, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.
- [10] K.Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 4a.ed. Madrid: Pearson Educación, 2003.