

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA AÉREA PARA LA CAPTACIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA

J.A. Rodríguez-Haro^a, J.C. Moreno^a, J.L. Guzmán^a, F. Aguilar^b, Y. Cantón^b

^aDepartamento de Informática, ^bDepartamento de Ingeniería

Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, 04120

juanroha@gmail.com, jcmoreno@ual.es, jose Luis.guzman@ual.es, faguilar@ual.es, ycanton@ual.es

Resumen

En este artículo se enumeran y se explican los principales aspectos a tener en cuenta en el diseño y construcción de una plataforma aérea capaz de transportar un escáner láser o una cámara multispectral (en general cualquier tipo de sensor con un peso inferior a 2kg) para la captación de información topográfica.

Palabras Clave: Diseño, construcción, plataforma aérea, topografía, multirotor.

1 INTRODUCCIÓN

Los avances en robótica han permitido que vehículos autónomos puedan llevar a cabo tareas tediosas o de cierto riesgo para la seguridad. En las últimas décadas, el desarrollo de los vehículos autónomos ha sido de gran interés y numerosos tipos de vehículos se han desarrollado en todo el mundo. Basándose en su ambiente de trabajo, se pueden clasificar en aéreos (UAVs), terrestres (UGVs) y acuáticos (AUVs). Los UAVs en especial, tienen numerosas aplicaciones en situaciones de emergencia ya que permiten un acercamiento a zonas donde se han producido terremotos, inundaciones, volcanes activos e incluso catástrofes nucleares, y que por lo tanto son de difícil o peligroso acceso para humanos.

Entre la gran variedad de UAVs que han sido creados, los llamados small-scale HUAVs (helicopter-based UAVs) o VTOL (Vertical Take-Off and Landing) [10] son capaces de despegar y aterrizar totalmente en vertical, además de alcanzar altas velocidades de crucero. Pero sin duda su mayor ventaja es la de “flotar”, es decir, son capaces de mantener una posición fija a una altura establecida, permitiendo de este modo una mayor eficacia en el reconocimiento y observación de objetivos. Otra ventaja crucial, que justifica el interés suscitado en este tipo de UAV, es su bajo coste de producción y de operación.

Un VTOL se puede presentar con diferentes configuraciones, con rotor principal y rotor de cola

(helicópteros), rotores coaxiales, rotores en tándem o multirrotores. Estos últimos (figura 1), son los que se están empleando en la mayoría de aplicaciones con robots aéreos, desde la revisión de líneas aéreas de alta tensión, inspección de bosques con cámaras térmicas, fotografía aérea, hasta el empleo de estos vehículos como plataformas para escáneres láseres de reconstrucción de superficies terrestres. Todo ello debido principalmente a su gran estabilidad de vuelo, a su completo control autónomo, su bajo coste y a la posibilidad de volar con vientos de hasta 80km/h.



Figura 1: Aibot X6 V2 [11]

Hasta ahora, los escáneres láseres aerotransportados procedentes de los principales fabricantes no se habían podido montar en UAVs con fines comerciales, debido principalmente a su gran tamaño y peso y a las limitaciones de carga de estas ligeras aeronaves. Sin embargo, recientemente varios fabricantes han realizado numerosos esfuerzos para ser capaces de desarrollar escáneres láser concebidos para ser montados en estos aparatos, empleándose en sistemas de mapeo móviles [14].

Este trabajo se centra en los aspectos básicos a tener en cuenta en el diseño, desarrollo, construcción y ajuste de una plataforma aérea (drone) capaz de transportar y operar un sensor con tecnología LIDAR (Laser Image Detection And Ranging) [21], una cámara con tecnología TOF (Time Of Flight) [23] o un sistema de imagen multispectral [22], que permita el reconocimiento de superficies terrestres.

2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES

Una gran ventaja de los multirrotores es el escaso número de componentes necesarios para su correcto funcionamiento. Cuando se trata de la realización de actividades con fines profesionales o industriales, el equipamiento necesario para la tarea tiende a ser más costoso, más pesado y más voluminoso; por lo que los componentes que integran la estructura principal del multirrotor juegan un papel crucial, garantizando la rigidez, la potencia y la estabilidad necesaria para llevar a cabo las operaciones de manera controlada.

Ese alto nivel de la calidad en los componentes ha sido el responsable de que plataformas aéreas destinadas a labores industriales tengan un coste tan elevado que un gran número de empresas no muestran interés en ellos.

El objetivo principal de este artículo es conseguir una plataforma aérea para fines de reconstrucción de superficies terrestres con el menor coste posible, pero sin prescindir de la seguridad y calidad de los sistemas comerciales mucho más costosos.

2.1 SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA PLATAFORMA AÉREA

2.1.1 Distribución y número de motores necesarios

Son numerosas las posiciones y orientaciones que pueden presentar los motores en un multirrotor. Si bien las más extendidas son tres (figura 2), quadrotor (cuatro motores), hexarotor (seis motores) y octorotor (ocho motores). En todas ellas, todos los motores están colocados sobre el mismo plano y con el eje de rotación del motor perpendicular al suelo.



Figura 2: Distribuciones más comunes de los motores

La estructura sencilla del quadrotor lo hace ideal para emplearlo como plataforma de ensayos debido a su ligereza y facilidad de programación, pero tienen el gran inconveniente de que cuando se produce el fallo de un motor, no son capaces de soportar un vuelo estable el tiempo necesario como para poder realizar un aterrizaje de emergencia, de modo que acaban estrellándose. Sin embargo, no ocurre lo mismo en los hexarotors y octorotors, ya que un mayor número de rotores, permite el funcionamiento “controlable” del

drone y su aterrizaje aun cuando se produce una avería en alguno de sus motores.

Es por ello que la plataforma aérea que se desea construir deberá tener un mínimo de seis rotores. De esta forma al aumentar el número de motores, se disminuye el tamaño de hélice necesario, consiguiendo un vuelo más suave que su equivalencia en un quadrotor con hélices de mayores dimensiones.

La carga máxima que debe poder soportar el drone (sin tener en cuenta el peso del propio vehículo) está fijada en 2kg, por lo que no es necesario emplear una estructura con 8 rotores, ya que unos buenos motores proporcionarán potencia suficiente sin la necesidad de aumentar el número total, resultando más barato y disminuyendo de esta forma la probabilidad de que algún elemento falle al reducir el número de componentes móviles.

2.1.2 Selección de un modelo de estructura comercial

En el mercado hay numerosas estructuras de todo tipo de materiales: plástico, aluminio, fibra de vidrio, ..., pero si se desea conseguir la rigidez máxima con el peso mínimo, se debe recurrir a la fibra de carbono. La elección ha sido una plataforma de la marca Tarot modelo T810 [6], fabricada en fibra de carbono 3K, con un diámetro total de 870mm, una distancia entre motores de 810mm y un peso de 1kg, (figura 3).



Figura 3: Estructura Tarot T810

2.2 SELECCIÓN DEL SOPORTE PARA EL DISPOSITIVO DE RECONSTRUCCIÓN

Cuando se trata de obtener una imagen aérea de una superficie, el principal problema es conseguir una captura estable, clara y con una orientación determinada independientemente de la situación del drone. Para ello, se debe incluir en la plataforma un sistema que se encargue de la estabilización del dispositivo.

En los últimos meses los estabilizadores con motores *brushless* han revolucionado el mercado, ofreciendo gran margen de estabilidad frente a perturbaciones. Sin embargo, unas limitaciones de peso muy exigentes

son las responsables de su imposibilidad de uso en esta plataforma aérea, ya que el principal objetivo será que el soporte tenga una gran versatilidad que permita transportar cualquier sensor de tamaño medio destinado a reconstrucción o inspección de superficies terrestres cuyo peso no exceda de 2kg.

El modelo elegido es por tanto un estabilizador de servos de 3kg de par, fabricado totalmente en fibra de carbono 3K de la marca Tarot [5] que ofrece una estabilización en los tres ejes, *roll*, *pitch* y *yaw*.

2.3 TARJETA CONTROLADORA

El componente más importante de un multirotor es su tarjeta de control, en la cual se integran todo un conjunto de sensores encargados de mantener un vuelo estable y controlado, con la función adicional de realizar trayectorias de forma totalmente autónoma, sin necesidad de ser teleoperado.

Ardupilot 2.6 [20] es un sistema de código libre compatible con arduino [7], que permite la configuración total del drone, además de una característica muy importante y diferenciadora con la mayoría de productos de los demás fabricantes: que permite la obtención de *datalogs* de forma *offline* y la posibilidad de representación de todos los parámetros de vuelo en directo.

La controladora incorpora:

- Chip de Atmel para procesamiento, ATMEGA2560.
- Chip para funciones USB, ATMEGA32U-2.
- 4 MegaBytes para Datalogging.
- Acelerómetro + Giróscopo de 3 ejes cada uno, MPU-6000 MEMS MotionTracking.
- Brújula digital de 3 ejes, HMC5883L-TR.
- Altímetro de alta resolución, MS5611, MEAS.
- GPS u-blox LEA6

2.4 MOTORES, VARIADORES DE POTENCIA, HÉLICES Y BATERÍAS

2.4.1 Tipo de motores, variadores de potencia y hélices

Los componentes de mayor importancia en la calidad del vuelo de un drone son sus motores. Es el factor que determinará la carga total que podrá levantar y el tiempo máximo de vuelo. Se debe buscar por tanto la mayor eficiencia de los motores en vuelo. Para ello los fabricantes de productos de alta calidad realizan ensayos con sus motores y publican unas tablas de consumo frente a empuje, que pueden ser utilizadas por el cliente para concretar qué tipo de motor se debería emplear en función de la carga a levantar y el tiempo de vuelo que se quiera conseguir.

Para dotar a la plataforma aérea de motores, se ha llevado a cabo un pequeño estudio de tres motores de la marca T-Motor. Los modelos elegidos pertenecen a la gama *Navigator* y se denominan, MN4012KV340 [13], MN4012KV400 [13] y MN4010KV370 [12]. Todos ellos poseen un voltaje de funcionamiento recomendado de 22,2V, montan unas hélices de la propia marca [8], de 15" de diámetro fabricadas totalmente en fibra de carbono 3K, y los variadores de potencia (ESC) de cada motor [4], también de la misma marca y con un amperaje máximo de 40A.

En la figura 4 se muestra una representación gráfica de la curva de consumo frente empuje de los tres motores. A partir de estas curvas se puede comprobar qué motor es más eficiente para un peso conocido.

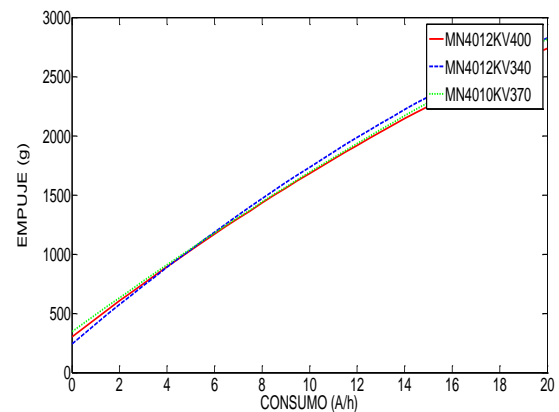


Figura 4: Comparativa de empuje frente a consumo de los tres motores, según datos de fabricante

A continuación se deberá estimar el peso total de la plataforma para conocer el valor del empuje mínimo que deberán realizar los seis motores en conjunto para mantener el vuelo sin variación de altitud.

2.4.2 Estimación del peso total de la plataforma aérea

Un factor de bastante importancia en el peso total del aparato son las baterías. Se debe conseguir un equilibrio en cantidad de A/h que puede llevar el drone y el peso total que ello supone. En este caso se decide emplear baterías de tecnología LIPO, ampliamente utilizadas en el mundo del radiocontrol debido a su gran tolerancia a ratios de descarga muy elevados, con un voltaje nominal de 22,2V y una capacidad de 8000mA/h por unidad [2]. La posibilidad de acoplar más de una batería en paralelo se estudiará en el apartado 2.4.3. En la tabla 1 se reflejan los resultados.

Tabla 1: Peso unitario de cada elemento que se empleará en el dron

Nombre	Masa(g)
Estructura hexarotor	1100
Gimbal	1000
Motores	130
Variadores 40A	35
Controladora	75
Hélice	Despreciable
Batería	1105
Carga	2000

A continuación se calcula el peso de la plataforma contemplando la opción de cargar una o dos baterías haciendo uso de la ecuación (1).

$$M_{Total} = m_{Gimbal} + m_{Estructura} + m_{Controladora} + N_{Motores} \cdot m_{Motor} + N_{Variadores} \cdot m_{Variador} + m_{carga} + N_{Baterias} \cdot m_{Bateria} \quad (1)$$

2.4.2.1 Cálculo de la masa total de la plataforma aérea con una sola batería:

Mediante (1), se obtiene que:

$$M_{Total}(g) = 1000 + 1100 + 75 + 6 \cdot 130 + 6 \cdot 35 + 2000 + 1 \cdot 1105 = 6270g$$

Por tanto, el empuje necesario de cada motor se obtiene mediante (2), resultando en lo siguiente:

$$E(g) = \frac{M_{Total}(g)}{N_{Motores}} \quad (2)$$

$$E(g) = 1045g/motor$$

2.4.2.2 Cálculo de la masa total de la plataforma aérea con dos baterías:

De nuevo, mediante (1) se obtiene:

$$M_{Total}(g) = 1000 + 1100 + 75 + 6 \cdot 130 + 6 \cdot 35 + 2000 + 2 \cdot 1105 = 7375g$$

Y por tanto, el empuje necesario de cada motor se obtiene mediante (2):

$$E(g) = 1229g/motor$$

2.4.3 Cálculo del consumo de cada modelo de motor para cada distribución de baterías

A partir de los datos obtenidos en el apartado anterior, se puede obtener por medio de una interpolación de las curvas de la figura 4, un valor aproximado del consumo del motor para un empuje determinado, en este caso, 1045 gramos cuando sólo se porta una

batería, y 1229 gramos cuando porta dos. En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2: Comparativa del consumo de cada modelo de motor en función del número de baterías a transportar y con una carga fija de 2kg

Modelo del motor	Consumo (A)	
	1 Batería	2 Baterías
MN4012KV340	5,03	6,30
MN4012KV400	5,10	6,45
MN4010KV370	5,05	6,40

2.4.4 Análisis de resultados y selección del motor

A vista de los resultados que se muestran en la tabla 2, los tres motores poseen un consumo muy similar, si bien destaca el modelo MN4012KV340 por tener el consumo menor, convirtiéndolo de esta forma en el motor elegido. Otro factor decisivo en su elección es que si se produce un aumento de peso por incorporación de un elemento externo temporal, el modelo MN4012KV340 será capaz de producir más empuje con el mismo consumo que los demás tal y como queda reflejado en la figura 4.

2.5 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO MÁXIMO DE VUELO

Conocido el consumo de amperios por hora del motor, se puede estimar el tiempo de vuelo del hexarotor a partir del número de baterías que se carguen.

El tiempo total de vuelo en minutos se puede obtener como:

$$t(min) = \frac{Capac. baterías(A \cdot h)}{1,1 \cdot Consumo total (A)} \cdot \frac{60min}{1h} \quad (3)$$

Como se observa en (3), el consumo total de los motores es incrementado en un 10% para simular el proceso de colocación a altura de trabajo y posibles correcciones de posición que conlleven consumos puntuales superiores a los estimados. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3: Tiempo de vuelo máximo estimado para el motor MN4012KV340 en función del número de baterías a transportar y con una carga fija de 2kg

Nº de Baterías	Tiempo máximo de vuelo estimado
1 Batería	14' 45''
2 Baterías	23' 6''

Es importante resaltar que el tiempo obtenido es para un valor de carga máxima de 2kg. Pero si el dron

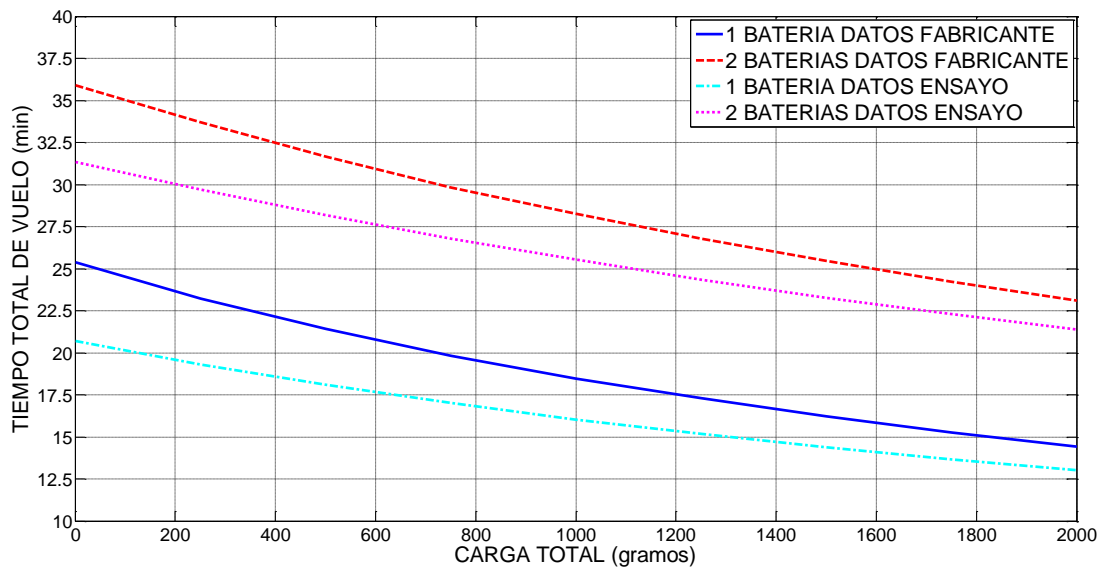


Figura 5: Representación del tiempo total de vuelo en función de la carga a levantar

volara con menor peso, este tiempo se vería incrementado. Para poder saber en cualquier momento el tiempo de vuelo aproximado en función de la carga y número de baterías, se ha representado en la figura 5 el tiempo de vuelo **estimado a partir de los datos del fabricante** frente al peso de la carga. Dependiendo del número de baterías que transporte el hexarotor (1 batería, línea azul continua; 2 baterías, línea roja discontinua), el tiempo total variará.

2.6 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE VIDEO Y TELEMETRÍA

Para poder obtener todos los datos de los sensores que porta la placa Ardupilot 2.6, cuando el hexarotor está en el aire, es necesario establecer una comunicación inalámbrica entre éste y la estación de tierra. Para ello se emplea la tecnología Zigbee [16], ya sea por medio del uso de dos placas Xbee o mediante el modelo comercial que proporciona Ardupilot [18] (3DR radio).

ArduPilot proporciona una comunicación serie por medio del protocolo MavLink [15], que permite representar gráficamente todos los parámetros utilizando el programa QGroundControl [17], como se muestra en la figura 6.

Por otro lado, se puede instalar en la propia plataforma un sistema de transmisión de video que permita visualizar en una pantalla el campo de visión de la cámara o escáner (si permite salida de video) en todo momento con el fin de mejorar las capturas. Se aconseja instalar un sistema que trabaje con una frecuencia de 5,8GHz para evitar solapes con la señal de control que se encuentra en la frecuencia de los 2,4GHz.

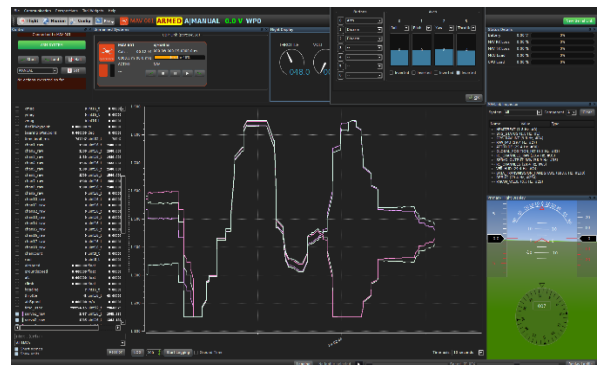


Figura 6: Representación de datos a través del programa QGroundControl

3 RESULTADOS

3.1 ENSAYO CON MOTOR MN4012KV340

Una vez que se han seleccionado y adquirido todos los materiales, comienza el proceso de construcción y puesta a punto de todos los componentes. En primer lugar se debe realizar una prueba de potencia a los motores, para verificar que los datos ofrecidos por el fabricante son de confianza y que por lo tanto se van a cumplir los tiempos calculados en el apartado 2.5.

Se coloca el motor, con la hélice ya acoplada, sobre un banco de pruebas fijado a una balanza digital. Se coloca un amperímetro entre la batería y el ESC (tal y como se muestra en la figura 7) y se pone en marcha el motor. Es recomendable establecer unos puntos de funcionamiento previos al ensayo para anotar los valores de consumo de amperios. En el caso de este

ensayo, los puntos se tomaron cada 250 gramos de empuje con un intervalo de 0 a 3000 gramos.

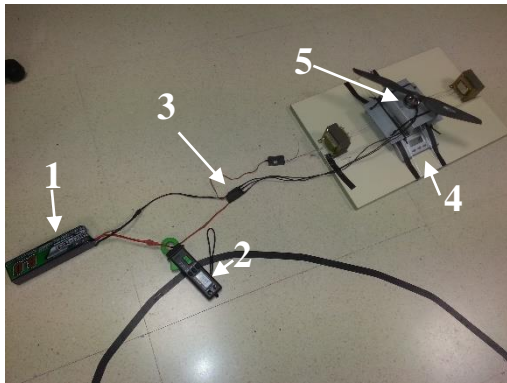


Figura 7: Montaje para realización de toma de datos del motor (1-Batería 8000mAh, 2-Amperímetro digital, 3-Variador de potencia, 4-Báscula digital, 5-Motor MN4012KV340 con hélice de carbono)

Los resultados del tiempo de vuelo **obtenidos a partir del ensayo** se representan en la figura 5, para una y para dos baterías, junto con los datos proporcionados por el fabricante. Claramente se pueden observar las diferencias entre los datos aportados por el fabricante y los resultados del banco de ensayo. Esto es fundamental para la puesta a punto del drone.

3.2 CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO

El primer elemento que se debe montar es la estructura base para poder realizar la distribución de todos los componentes electrónicos. En el caso de esta plataforma aérea se opta por utilizar una placa de distribución (figura 8) para alimentar todo el conjunto de ESC, evitando de esta forma, problemas con las uniones soldadas entre los cables.

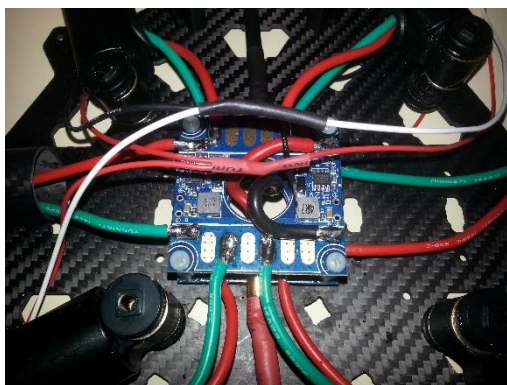


Figura 8: Placa de distribución de potencia

Una vez montados los motores y la estructura, se deben programar y calibrar los ESC para asegurar que todos responden a una entrada determinada con la misma salida y descartar de esta forma posibles problemas de funcionamiento (figura 9).

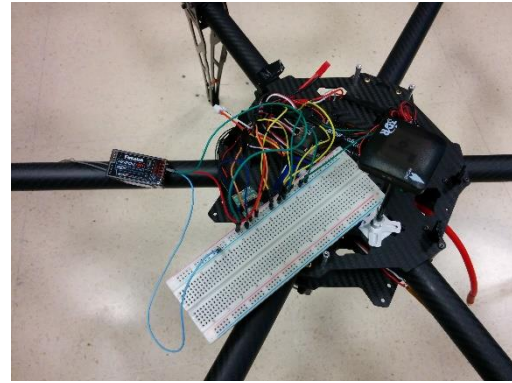


Figura 9: Programación y calibración de los ESCs del hexarotor

Terminado el proceso de montaje, se carga el programa deseado en la controladora. En este caso se va a hacer uso del propio código que desarrolla la compañía Ardupilot de software libre [19] y que permite configurar y tener acceso a múltiples modos de vuelo. Asimismo se programan las trayectorias autónomas mediante *waypoints* a través del programa MissionPlanner [11].

Una vez cargado el código es aconsejable volar el drone con unas sujeciones, como se muestra en la figura 10, que permita comprobar si estabiliza correctamente.



Figura 10: Sistema de sujeción aconsejado para comprobación de vuelo

Aprovechando que el drone está sujetado, es aconsejable realizar un primer ajuste de los principales controladores del drone a partir del esquema de

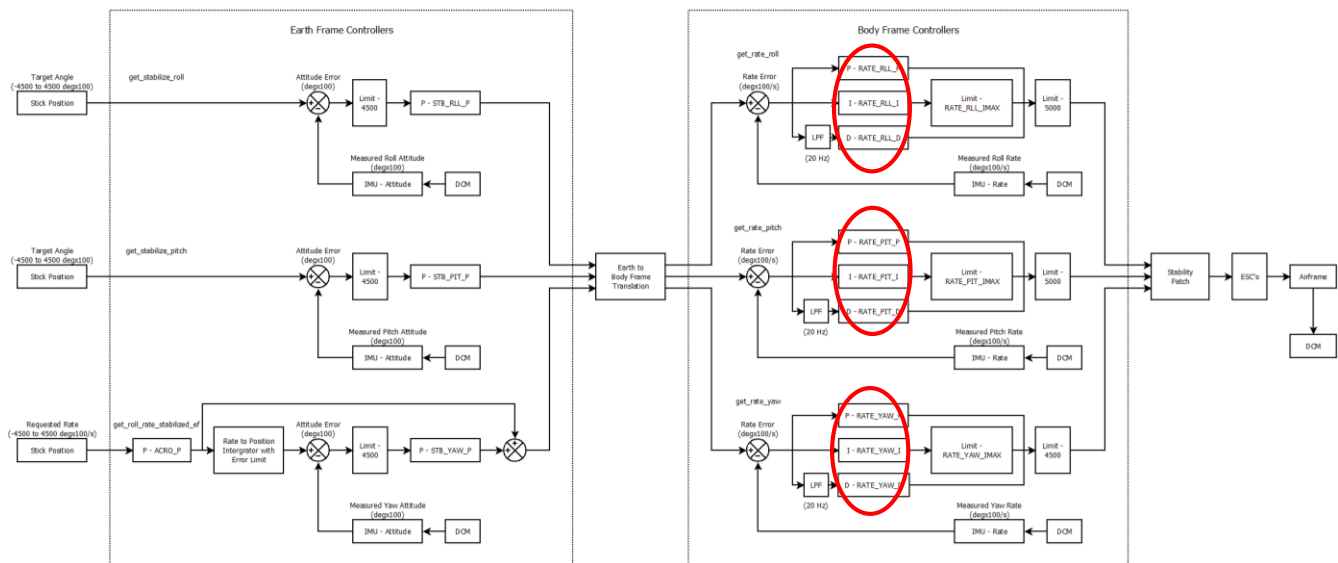


Figura 11: ArduCopter V3.1 Stabilize Roll, Pitch and Yaw PID's (100Hz rate update)

control PID [9] que proporciona Ardupilot y que se muestra en la figura 11. Se deben configurar los parámetros que se encuentran rodeados con un círculo rojo y que son los encargados de controlar la velocidad angular de cada eje de giro del drone.

3.2 IMÁGENES MULTIESPECTRALES OBTENIDAS EN UN ENSAYO CON ESTA PLATAFORMA AÉREA

Como ejemplo de una de las aplicaciones a las que se va a destinar el drone, la figura 12, muestra una imagen obtenida en el primer ensayo real realizado en la Universidad de Almería. En este ensayo se toma una foto con la cámara multiespectral tetracam ADC [3] de la vegetación del campus. La figura 13 muestra la imagen procesada para la determinación de la masa vegetal.



Figura 12: Fotografía multiespectral del campus universitario



Figura 13: Fotografía post-procesada que muestra las zonas de vegetación en color rojo

Agradecimientos

El trabajo ha sido parcialmente desarrollado en el marco del Programa de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POCTEFEX 2008-2013, mediante el proyecto de referencia 0065_COPTRUST_3_E BACARCOS y en el marco del Plan Nacional Español de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante el proyecto de referencia CGL2011-29429.

Referencias

- [1] Aibot X6 V2 (Consultado 19/06/2014): <http://www.aibotix.es/aibot-x6.html>

- [2] Batería 8000mAh 6s 22,2V (Consultado el 10/06/2014):
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=32729
- [3] Cámara multiespectral tetracam ADC (Consultado el 10/06/2014):
<http://www.grupoacre.com/uavs/productos/ver/camara-multiespectral-tetracam-adc>
- [4] ESC T-motor 40A 400Hz (Consultado el 10/06/2014):
http://www.rctigermotor.com/html/2013/esc_0916/84.html
- [5] Estabilizador para cámara multiespectral o escáner láser (Consultado el 10/06/2014):
<http://www.foxtechfpv.com/tarot-5d2-gimbal-p-965.html>
- [6] Estructura Tarot T810 (Consultado el 10/06/2014):
http://www.tarot-rc.com/index.php?main_page=product_info&cPath=65_66&products_id=996
- [7] Evans, Brian. 2007. *Arduino programming notebook*. Creative Commons.
- [8] Hélices fibra de carbono de 15'' de diámetro (Consultado el 10/06/2014):
http://www.rctigermotor.com/html/2013/prop_0805/16.html
- [9] K.J. Aström; T. Hägglund, 2010. *Control PID Avanzado*, Ed. Pearson Education.
- [10] K. Nonami; F. Kendoul; S. Suzuki; W. Wang; D. Nakazawa. 2010. *Autonomous flying robots*. Springer; New York; 329pp.
- [11] MissionPlanner (Consultado el 10/06/2014):
<http://ardupilot.com/downloads/?did=82>
- [12] Motor RC Tiger Motor MN4010KV370 (Consultado el 10/06/2014):
http://www.rctigermotor.com/html/2013/Naviga tor_0910/38.html
- [13] Motor RC Tiger Motor MN4012KV340 y MN4012KV370 (Consultado el 10/06/2014):
http://www.rctigermotor.com/html/2013/Naviga tor_0910/39.html
- [14] Petrie, Gordon. 2013. *Current developments in airborne laser scan*. Geo Informatics.
- [15] Protocolo MAVlink (Consultado el 10/06/2014):
<http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>
- [16] Protocolo Zigbee (Consultado el 10/06/2014):
<http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx>
- [17] QGroundControl (Consultado el 10/06/2014):
<http://www.qgroundcontrol.org/>
- [18] Set de telemetría 3DR Radio (Zigbee) (Consultado el 10/06/2014):
<http://store.3drobotics.com/products/3dr-radio>
- [19] Software Ardupilot 3.1.6 (Consultado el 10/06/2014):
<https://github.com/diydrones/ardupilot>
- [20] Tarjeta controladora de vuelo Ardupilot 2.6 (Consultado el 10/06/2014):
<http://store.3drobotics.com/products/apm-2-6-kit-1>
- [21] Tecnología LIDAR (Consultado el 10/06/2014):
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/lidar.aspx>
- [22] Tecnología multiespectral (Consultado el 10/06/2014):
http://www.init.uji.es/index.php?option=com_content&view=article&id=94:aplicacionesdeimágenesmultiespectrales&catid=57:servicios-vision-por-ordenador&Itemid=47&lang=es
- [23] Ringbeck, Thorsten; Hagebeucker, Bianca. 2007. *A 3D time of flight camera for object detection*. PMDTechnologies; Zürich.