



Universidad de Oviedo

Construcción de una aeronave pilotada remotamente (RPA) con fines cartográficos.

Trabajo Fin de Máster

Autor: Víctor Alonso Díaz

Tutor académico: Silverio García Cortés

Junio, 2017

Contenido

Resumen.....	4
Abstrac.....	4
1. Objetivo.....	4
2. Introducción.....	4
3. Componentes y sensores.....	5
3.1. Componentes Aerodinámicos.....	5
3.2. Electrónica y elementos mecánicos.....	6
3.2.1. Emisora y receptor.....	6
3.2.2. Variador.....	8
3.2.3. Batería.....	9
3.2.4. Controladora de vuelo.....	10
3.2.5. Módulo de telemetría.....	11
3.2.6. Servos.....	11
3.2.7. Motor.....	12
3.2.8. Hélice.....	12
3.2.9. Tubo de Pitot.....	13
3.3. Sensores.....	14
3.3.1. Cámara de fotos convertida.....	14
3.4. Estación de control de tierra (GCS).....	17
4. Fases de integración y calibración.....	18
4.1. Montaje de la aeronave.....	18
4.2. Configuración de la controladora de vuelo.....	24
4.1.1. Instalación del Firmware.....	25
4.1.2. Calibración.....	26
4.2. Configuración y calibración de la emisora.....	27
4.3. Asignación de los modos de vuelo.....	29
4.4. Configuración de la cola en V del RPA.....	29
4.5. Configuración del Pitot.....	31
5. Integración de los sensores. Cámara Canon Powershot convertida a NGB.....	32
6. Documentación técnica sobre caracterización aeronave.....	35
6.1. Descripción y Caracterización del RPA Naja de Skywalker.....	36

6.1.1.	Fabricante, modelo, números de serie de la aeronave, motor, hélices, soporte de la carga de pago y carga de pago, piloto automático, emisora de control.....	36
6.1.2.	Planos/diagramas con dimensiones del vehículo aéreo.	37
6.1.3.	Listado de componentes y equipos	39
6.1.4.	Masa del vehículo aéreo en vacío y masa máxima al despegue MTOW (incluyendo carga de pago y combustible).....	40
6.1.5.	Descripción del piloto automático y sistema de navegación	40
6.1.6.	Descripción del software de configuración.	41
6.1.7.	Descripción del sistema de alimentación eléctrica o de combustible.	43
6.1.8.	Capacidad de las baterías.	43
6.1.9.	Descripción del sistema de propulsión: potencia en kW	44
6.1.10.	Especificaciones técnicas del variador de velocidad (ESC).....	45
6.1.11.	Descripción del enlace de radio del sistema de mando y control.....	46
6.1.12.	Descripción de la carga de pago.	46
6.1.13.	Descripción del soporte de la carga de pago.....	47
6.1.14.	Descripción del sistema de terminación de vuelo.....	48
7.	Conclusiones y valoraciones.	48
7.1.	Coste total.	48
8.	Bibliografía.	50
9.	Anexos.....	51
9.1.	Anexo 1: Esquema de Conexión de la Controladora a la Cámara.	51
9.2.	Anexo 2: Esquema General de Conexiones.	52

Resumen.

Los RPA's (aeronaves pilotadas remotamente, por sus siglas en inglés Remotely Piloted Aircraft) han supuesto un avance tecnológico muy importante en los últimos años, utilizándose en multitud de industrias, por ejemplo, en la cartográfica, que ha permitido abaratar costes y tiempos, o cambiar el método de trabajo, como puede ser en el control de torres de alta tensión. También son objeto de investigación para adaptarlos a otros trabajos, como está ocurriendo actualmente en el sector del reparto de paquetería o mensajería. Existen diferentes vehículos dentro de los RPA's como son los multicopteros (ala giratoria) o los aviones (ala fija) con particularidades claramente diferenciadas dentro de cada uno. Este trabajo se centra en los RPA's de ala fija con empenaje en forma de V, explicando los componentes básicos que necesita para realizar un vuelo autónomo, las particularidades técnicas del RPA según su configuración, así como el montaje en la estructura del vehículo de todos los componentes, y la implantación de una cámara fotográfica, para, mediante misiones de vuelos autónomos, cartografiar una determinada región.

Abstrac.

RPAs (Remotely Piloted Aircraft) have been a very important technological advance in the last years, been used in many industries, in mapping industry for example, allowing to lower costs and times, or changing the working method, such as in the control of high-voltage towers. They are also the subject of research to adapt them to other works, as is currently occurring in the delivery and messaging sector. There are different vehicles within the RPAs such as multicopters (rotational wing) or aircraft (fixed wing) with clearly differentiated features within each one. This work focuses on fixed-wing RPAs with V-tail empennage, explaining the basic components needed to perform an autonomous flight, the technical characteristics of the RPA according to its configuration, as well as the assembly in the structure of the vehicle of all the components and the implementation of a camera to, by means of autonomous flight missions, map a specific region.

1. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es el montaje de todos los elementos necesarios para construir un RPA de ala fija, la posterior calibración de los instrumentos y sensores que posibilitan el vuelo autónomo y la instalación y posterior configuración de un disparador remoto que permitirá accionar el obturador de la cámara de fotos para la obtención de fotografías aéreas.

2. Introducción.

Hace unos años pensar que con una cámara comercial de gama media se podría realizar un trabajo de fotogrametría aérea con buena calidad, resultaría difícil de creer. Pero con los avances que se producen año a año en la mejora de materiales o

en el desarrollo de nuevas técnicas, da como resultado cámaras de un coste relativamente bajo, capaces de obtener grandes resultados.

Si bien a esto le añadimos que en el mundo del aeromodelismo ha pasado lo mismo, con la aparición de motores con mejor rendimiento o una electrónica capaz de dotar de inteligencia a un objeto, y se lo sumamos a lo dicho antes de las cámaras, da como resultado una herramienta con una versatilidad enorme, con la que podemos realizar trabajos de fotogrametría aérea con calidad, acortando plazos o generar cartografía de detalle en ámbitos más locales.

3. Componentes y sensores.

3.1. Componentes Aerodinámicos.

La aeronave escogida para realizar este trabajo cartográfico es un NAJA Skywalker. Esta aeronave presenta una configuración de ala alta con cola en “V” positiva. La principal característica de un ala alta, es como su propio nombre indica, que la disposición del ala está en la parte superior del fuselaje. La principal ventaja es que el centro de gravedad se encuentra por debajo del ala, por lo que la aeronave tiende a ser más estable que aviones con configuraciones de ala media o baja.

La parte más característica de este RPA es la forma del empenaje en “V” o “butterfly”, en la que se sustituyen los estabilizadores vertical y horizontal por uno horizontal con gran ángulo de diedro.



Ilustración 1: B35 con cola en V.

Las superficies de control se encuentran en el borde de salida de cada uno de los estabilizadores del empenaje, y reciben el nombre de “Ruddervators” mezcla de las palabras en inglés de rudder (timón) y elevator (elevador). Dependiendo del sentido en el que se deflecten, la actitud del avión varía, de tal forma que si se desplazan los dos en el mismo sentido el RPA cabeceará, o si por el contrario se deflectan ambos en sentidos opuestos el RPA guiñará.

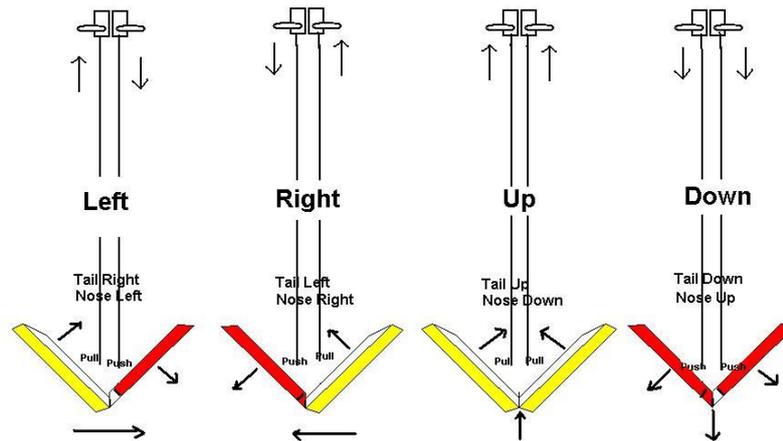


Ilustración 2: Movimiento Ruddervators en cola en V.

Las ventajas que presenta este empenaje es que es más ligera que una configuración convencional en forma de T, y presenta una menor resistencia al aire, aunque según estudios, esta diferencia no es muy grande ya que para obtener la misma eficiencia aerodinámica que una cola en T, los estabilizadores tienen que ser ligeramente mayores.

La principal desventaja es en el manejo, porque para hacer guiñar y cabecear la aeronave se requiere un sistema de control más complejo necesitándose una mezcla electrónica para controlar la aeronave.

El perfil alar usado en este RPA es un Clark Y, llamado así por su diseñador y pionero de la aviación Virginus Evans Clark. Es un tipo de perfil diseñado en el año 1922 cuya principal característica es que el intradós es plano, lo que facilita mucho su construcción.



Ilustración 3: Perfil alar Clark Y.

Para muchas practicas tiene una relación sustentación/arrastre relativamente óptimo, y la performance de este perfil le otorga una velocidad de perdida baja, permitiendo vuelos lentos de forma estable.

3.2. Electrónica y elementos mecánicos.

3.2.1. Emisora y receptor.

La emisora es un mando de control remoto el cual nos permite ejercer el control sobre nuestro vehículo de radiocontrol, ya sea un coche, un barco o como en nuestro caso un aeromodelo.



Ilustración 4: Emisora 2,4 Ghz

Existen diferentes sistemas de emisión en AM, FM, 35 Mhz, 2,4GHz, 5,8GHz y diferentes métodos de modulación de la señal como son los PWM (Modulación por ancho de pulso) y PPM (Modulación por posición de pulsos) entre otros. Actualmente la mayoría de emisoras trabajan en la frecuencia de 2,4 Ghz, ya que permiten el uso de antenas más pequeñas que, por ejemplo, las que se usaban en la frecuencia de 35 Mhz, lo que supone una mejora en la comodidad y la eficiencia de estas. Aunque la principal ventaja y característica de esta frecuencia es el uso del espectro ensanchado DSS para disminuir los problemas de ruido e interferencias en la señal, algo muy importante en RPA's. Este sistema consiste en cambiar de frecuencia de comunicación de forma "pseudoaleatoria" en el tiempo, según un código que solo conocen el módulo emisor y el módulo receptor (colocado en nuestro RPA).

El espectro ensanchado engloba el FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) y DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

El FHSS es un sistema en el que se transmite la información cambiando de frecuencia de transmisión cientos de veces por segundo, en la que es necesario que el emisor y el receptor conozcan la secuencia de cambio de frecuencia de antemano.

EL DSSS lo que hace es aumentar el ancho de banda, haciendo que la señal ocupe más, permitiendo así enviar varios canales de información solapados entre sí en tiempo y frecuencia. El receptor recibe toda esta información unida, pero como se conoce la codificación, este es capaz de volver a desglosar todos los canales de información y recuperar así la señal.

Ambos sistemas necesitan de una buena sincronización entre emisor y receptor para mejorar la robustez de la comunicación, lo que encarece los precios.

Por otro lado, el receptor es el otro dispositivo necesario para establecer la comunicación entre la emisora y la propia aeronave. Este va colocado en el RPA, y se encarga de recibir y decodificar la señal enviada por la emisora transmitiendo esta información a los servos o la controladora de vuelo, haciendo que el RPA actúe según nuestras órdenes.



Ilustración 5: Receptor 2,4 Ghz

Al igual que la emisora, los receptores funcionan en unas frecuencias determinadas, siendo necesario que trabaje en la misma que la emisora, además de estar “emparejado” con el módulo emisor para que así sea capaz de decodificar la información.

3.2.2. Variador.

También conocido como ESCs (Electronic Speed Controllers”), es el instrumento electrónico encargado de regular la velocidad de giro del motor y de introducir la corriente en el bobinado correcto en el tiempo adecuado para mantener el movimiento rotatorio.



Ilustración 6: Variador o ESCs

Consta de:

- **Módulo de potencia:** Constituido por 6 interruptores, dos por cada una de las fases del motor, que abren y cierran sincronizadamente, aplicando tensión a cada fase del motor, para crear el campo magnético que hace girar el motor.
- **BEC:** También conocido como regulador lineal. Se encarga de reducir la tensión que llega de la batería a 5V para alimentar otros componentes del RPA.
- **Microcontrolador:** Ejecuta el algoritmo de control de velocidad a partir de la señal que recibe del receptor o de la controladora. Cuanto mejor este implementado este algoritmo, más fluido y progresivo será el aumento o disminución de las revoluciones del motor.

3.2.3. Batería.

Es la herramienta que nos permite suministrar la corriente eléctrica necesaria para que todo funcione. Se la puede definir como el dispositivo capaz de transformar la energía química almacenada en energía eléctrica. Están formadas por celdas, que a su vez cada una contiene un electrodo positivo o ánodo, y un electrodo negativo o cátodo.

La composición química de estas baterías es LiPo, es decir, baterías de Litio-Ion-Polímero.



Ilustración 7: Batería LiPo 3s 2200mA 20C.

Los distintos parámetros que conforma una batería son:

- **Tensión o número de celdas:** La tensión de las baterías viene dado por el número de celdas conectadas en serie, considerando que cada celda tiene una tensión nominal de 3,7 V que a plena carga alcanza los 4,2 V. De esta forma se pueden denominar las baterías como de 11,1 V o 3S (3 celdas) o 14,8 V o 4S, etc.
- **Capacidad:** Son los miliamperios (mA) que puede entregar durante una hora. Suele denominarse C y aparece indicado en el exterior de la batería.
- **Capacidad de descarga:** Corriente máxima que la batería puede descargar. Se indica en múltiplos de 10 C y suelen darse dos valores: La corriente

que puede suministrar hasta agotar su energía y la que puede entregar durante un intervalo de tiempo breve.

- **Corriente máxima de carga:** No suele especificarse la corriente máxima de carga, aunque lo recomendado es no superar nunca los mA indicados en la batería, salvo que el fabricante indique que se puede.
- **Conector:** Existen multitud de conectores de baterías, siendo los más utilizados los XT60, aunque en el mercado podemos encontrar otros como bornas, T, etc.

3.2.4. Controladora de vuelo.

Es el elemento electrónico más importante, actúa como “cerebro” de la aeronave, ya que es capaz de recibir información del medio en el que se encuentra a través de los instrumentos que se describen a continuación y procesar dicha información para que sea capaz de tomar decisiones y hacer posible un vuelo de forma autónoma.

Suelen contar de forma habitual con:

- **Acelerómetros:** Miden la inercia de los movimientos a los que se somete la aeronave.
- **Giróscopos:** Se utilizan para medir la velocidad angular de los cambios de posición.
- **Magnetómetros:** Utilizado como brújula, se emplea para tener una referencia de una dirección y tener orientado el RPA.
- **Sensor barométrico:** Herramienta que nos indica la altitud real del vuelo.
- **Receptor GPS:** Utiliza la señal GPS para determinar sus coordenadas, lo que permite a su vez que pueda realizar vuelos autónomos.
- **Procesador:** Es el encargado de procesar toda la información que se capta, lo más importante es que este procesamiento sea lo más rápido posible.



Ilustración 8: Controladora de vuelo "Pixhawk"

3.2.5. Módulo de telemetría.

La telemetría nos sirve para tener monitorizado en tiempo real determinados datos tanto del medio, como del propio vehículo, teniendo una importancia relevante para llevar la misión a cabo y con una cierta seguridad.



Ilustración 9: Módulo de Telemetría.

El módulo de telemetría es el dispositivo de radio que nos permite tanto transmitir como recibir los datos que se generan y monitorizarlos. Consta de dos antenas, una transmisora, que va instalada en la aeronave, y otra receptora conectada a la estación de control de tierra, siendo a través de esta con la que podemos ver el nivel de batería, la actitud del avión, la posición GPS en tiempo real, etcétera.

3.2.6. Servos.

Dispositivo de corriente continua con capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de acción, así como de mantener estable dicha posición. Son las encargadas de mover las superficies de control del RPA.



Ilustración 10: Servo o Servomotor.

Los servos están compuestos por los siguientes elementos:

- Motor:
- Engranajes reductores:
- Circuitos de control:
- Potenciómetros, sondas de efecto Hall o sistema óptico:
- Envoltente:

- Cruceta o brazo:

3.2.7. Motor.

Es la parte del RPA encargada de transformar la energía eléctrica que transmite la batería en energía mecánica, haciendo girar la hélice y generando la tracción o empuje necesarios para que el RPA avance.



Ilustración 11: Motor Brushless.

Este tipo de motores eléctricos se denominan Brushless (sin escobillas), pudiendo diferenciar dentro de estos los motores Outrunner e Inrunner.

Los más habituales en radiocontrol son los Outrunner, denominados así porque la parte giratoria del motor es la envolvente externa, que contiene los imanes.

El funcionamiento de estos motores se basa en que el variador introduce la corriente eléctrica en las fases del motor en un orden determinado, haciendo que esta corriente llegue a las bobinas del motor, generando un campo electromagnético del mismo polo que los imanes de la envolvente, y como los polos del mismo signo se repelen, se consigue el movimiento del motor traduciéndose en el giro de la hélice.

3.2.8. Hélice.

Es un dispositivo mecánico formado por un conjunto de elementos denominados palas o álabes, montados de forma concéntrica y solidarios a un eje que, al girar, hace que los álabes describan un movimiento rotativo en torno a un plano. Presentan un perfil de ataque variable, desde el centro hasta las puntas, que hace que la diferencia de presión o empuje sea constante en todo el disco que barren.



Ilustración 12: Hélice de tres álabes o tripala.

Las hélices se definen mediante dos parámetros, el diámetro y el paso. El diámetro, como su propio nombre indica es el diámetro de la circunferencia que dibuja la hélice al girar. El paso, es la distancia recorrida por la hélice, en horizontal o vertical, cuando esta realiza una revolución completa. La nomenclatura utilizada para definir una hélice mediante estos parámetros es “13 x 3,5” lo que se traduce en una hélice con un diámetro 13 pulgadas y con un paso 3,5 pulgadas.

3.2.9. Tubo de Pitot.

Es un instrumento utilizado para calcular la presión total. Se utiliza mucho para medir la velocidad del aire o gases en aplicaciones industriales. Existen varios tipos de tubos de pitot, el tubo simple, la fuente estática y el tubo estático-pitot, siendo este último el que se describirá a continuación por ser el más usado en aviación y RPAs.

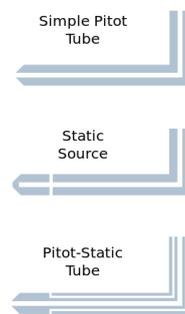


Ilustración 13: Tipos de Pitot.

El sistema estático-pitot es un conjunto de sensores e instrumentos sensibles a la presión, utilizado en aviación para determinar la velocidad de la aeronave con respecto al aire, la altitud y la variación de la altitud, mediante el anemómetro, el altímetro y el variómetro respectivamente.

El sistema instalado en el RPA es un Pitot-Estático electrónico, instalado en el morro de la aeronave y alineado con la dirección del flujo del aire. El funcionamiento consiste en que la diferencia de presión que detecta el pitot se convierte en una diferencia de potencial o voltaje mediante un piezoeléctrico, transmitiéndose a continuación esta información a la controladora de vuelo mediante la conexión I2C.



Ilustración 14: Tubo de Pitot.

3.3. Sensores.

3.3.1. Cámara de fotos convertida.

Para el desarrollo de aplicaciones cartográficas, el RPA ha sido modificado para poder cargar con una cámara, colocada en su bahía inferior de tal forma que es capaz de sacar fotos cenitalmente.



Ilustración 15: Canon Powershot SX260HS.

La cámara en cuestión es una Canon Powershot SX 260HS cuyas dimensiones y características técnicas son las siguientes:

- **Datos Generales:**

Procesador	Digic 5
Tipo de Sensor	CMOS BSI
Tamaño del Sensor	1 / 2.3
Relación de aspecto	4 : 3
Resolución del sensor	12.0 MP
Píxeles efectivos	4000 x 3000
Otras Resoluciones	2816x2112, 1600x1200, 4000x2248 (16:9), 4000x2664 (3:2), 2992x2992 (1:1)
Formato JPEG	JPEG 2.3, 2 niveles
Otros Formatos	-
Captura de Video	Full HD, con audio estéreo
Formato de Video	MOV H.264 + PCM estero
Resolución de Video	1920x1800 a 24fps, 1280x720, 640x480 a 30 fps, 320x240 a 120 fps

• **Sistema óptico:**

Distancia focal	25-500mm (real: 4.5 – 90mm.)
Zoom óptico	20x
Zoom digital	4x
Tipo de objetivo	12 elementos en 10 grupos (2 lentes asféricas, 1 UD)
Estabilizador	Si, óptico hasta 4 pasos. IS inteligente
Aberturas	F:3.5 – 6.8
Adaptador de accesorios	No
Rango de Enfoque	5 cm a infinito
Enfoque en macro	5 cm
Enfoque manual	Si
Enfoque automático	Si
Luz de ayuda	Si
Tipo de enfoque	TTL, Detección de caras, 1 punto (en el centro)
Modos de enfoque	Sencillo, Continuo, Seguimiento.

• **Control de Exposición:**

Rango de ISO	100 – 3200
Tipo de Obturador	Mecánica / electrónico
Velocidad de obturación	1/3200 a 15 segundos (según modos)
Comp. de Exposición	-2 a +2 EV en pasos de 1/3 EV
Medición de Exposición	Matricial evaluativa, Central ponderada, puntual (central)
Balance de Blanco	Auto, 6 presets, manual

• **Control de disparo:**

Modos de Exposición	<ul style="list-style-type: none"> • AE Programado • Prioridad a la abertura • Prioridad al obturador • Manual
Modos de escena	Si, inteligente, 58 Modos
Bracketing	-
Disparo Continuo	2.4 ips sin límite (0.8 en LV, 0.9 con AF) 10.3 ips en modo alta velocidad, hasta 10 tomas

Temporizador	2, 10 segundos o personalizado
Control remoto	no

- **Visualización:**

Tipo de visor	No
Pantalla trasera	3", 41600 pixeles TFT Pure-Color II G, Fija
Vista en vivo	Si

- **Flash**

Flash Incorporado	Si
Flash Externo	No
Modos de Flash	Auto, de relleno, sincro lenta, red. ojos rojos
Alcance de flash	0.5 – 3.5m (angular) 1.0 – 2.0 m (tele)

- **Memoria y conexiones:**

Tipo de tarjeta	SD / SDHC / SDXC
Conexión al ordenador	USB 2.0
Salida de Video	Si
Otras conexiones	miniHDMI

- **Características físicas:**

Resiste al agua	No
Alimentación	Batería de Litio incluida: NB-6L
Duración de la Batería	Foto: 230 disparos (GPS desactivado)
Datos del cuerpo	Metal con GPS
Dimensiones	105.5 x 61.0 x 32.7 mm. Volumen: 210 cm ³
Peso	231 g (con tarjeta y batería)

La particularidad que tiene esta cámara, aparte de portar GPS lo que permite obtener las coordenadas de la imagen directamente, es que se trata de una cámara convertida, es decir, se le ha modificado el sensor, haciendo que este capte el NIR (infrarojo cercano, de las siglas en ingles Near Infrared) en lugar del Rojo, por lo que a partir de

ahora nos referiremos a esta cámara como una cámara convertida a NGB (NIR, Green, Blue).

La utilidad principal de las cámaras NGB es en agricultura, para medir parámetros como el estrés, la biomasa, entre otros. Sabiendo que las plantas tienen bandas de absorción y de reflexión podemos cuantificar dichos parámetros relacionando estos dos factores. Al estar montada en un RPA permite utilizar el azul como canal de absorción y el infrarrojo como canal de reflexión, ya que al volar mucho más cerca del suelo que un sensor montado en un satélite, no está afectado por el principio de dispersión de Rayleigh, permitiendo así el cambio del rojo por el azul.

Además, el uso de los UAV's, permite la obtención de información en épocas críticas de la vegetación, con un costo menor y con una resolución espacial mayor al volar más cerca del suelo.

3.4. Estación de control de tierra (GCS).

Es un software, instalado en un ordenador, una tableta o un teléfono móvil, que nos permite gestionar determinadas operaciones del RPA, como hacer la planificación de un vuelo autónomo, observar que el transcurso de este sea correcto, realizar cambios en la planificación, configurar parámetros del vehículo, etc.

Existen multitud de GCS (por sus siglas en inglés Ground Control Station), dependiendo de la controladora de vuelo utilizada, así como, del sistema operativo que sea compatible con el software. En este trabajo al estar usando una Pixhawk como controladora de vuelo, se utilizó como GCS el "Mission Planner" por lo que la explicación más detallada será sobre esta estación de control.

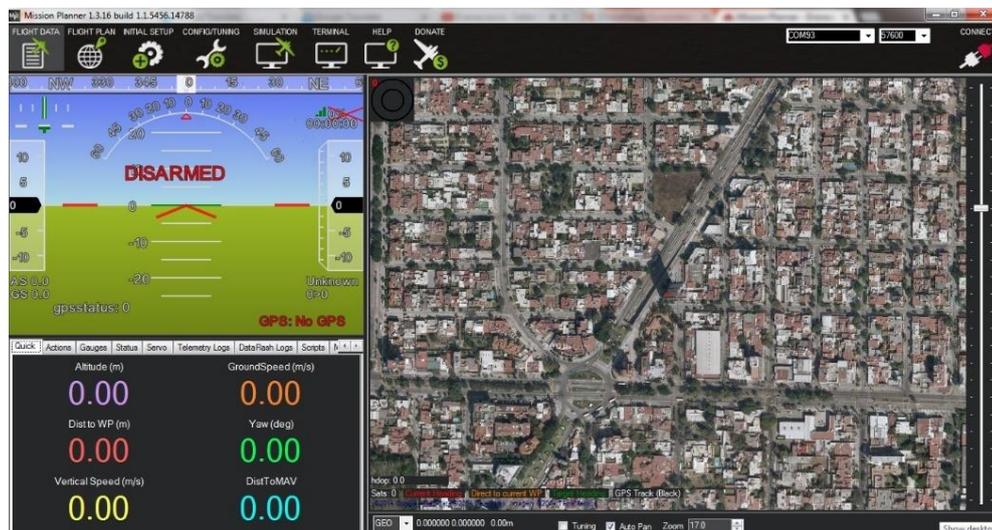


Ilustración 16: Interface del Mission Planner.

El Mission Planner es una estación que sirve para las controladoras de vuelo APM y su versión más moderna Pixhawk, que nos permite configurarlas para cuatro tipos de vehículos distintos: Avión, multicóptero, helicóptero y Rover (coche). Es compatible en Windows, Mac y Linux además de ser de descarga libre.

Permite múltiples opciones:

- Cargar el firmware del tipo de vehículo que se quiera manejar en la controladora.
- Configurar y calibrar el vehículo para un manejo y funcionamiento óptimo.
- Planificar, guardar y cargar misiones de piloto autónomo.
- Descargar y analizar los registros de la misión.
- Interfaz de simulador para realizar simulaciones de misiones UAV.
- Con un hardware de telemetría adecuado:
 - Supervisar el estado del vehículo durante la misión.
 - Recoger y grabar los datos de la telemetría.

4. Fases de integración y calibración.

4.1. Montaje de la aeronave.

Esta plataforma se puede adquirir al fabricante como un kit que necesita de un ensamblaje de determinadas piezas para conformar la aeronave. Para ello se ha ido ensamblando de la siguiente manera¹:

- Se comenzó montando las semialas de la aeronave, pegando las costillas de refuerzo de unión a los extremos de las alas.
- Para mejorar la estructura de las semialas se insertó unas varillas de fibra de carbono a lo largo del ala como se ve en la siguiente imagen.



Ilustración 17: Varilla de Fibra de Carbono.

- Después se colocaron los servos que mueven los alerones con sus correspondientes varillas de transmisión y el cableado de conexión a la controladora.
- Los servos se cubrieron con una tapa “cubreservos” que mejoran el acabado y la aerodinámica.

¹ Para el montaje del RPA, he sido ayudado por el profesor de la Universidad de Oviedo Manés Fernández Cabanas debido a su gran conocimiento y práctica tanto en RPA's como en el aeromodelismo más clásico.

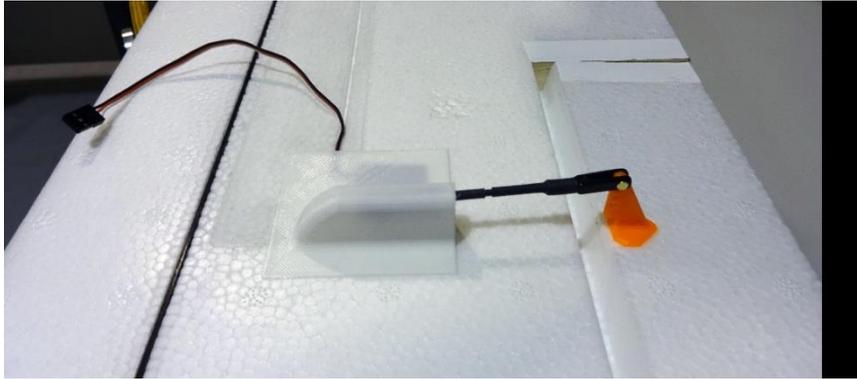


Ilustración 18: Tapa cubreservos.

- Por último, se reforzó la unión del alerón al ala mediante un abisagrado con vinilo.



Ilustración 19: Abisagrado superficies de control.

Una vez terminado el montaje y afinamiento de las alas, se pasó al montaje de las piezas correspondientes a la cola del avión. Esta parte consta de los dos estabilizadores, servos, y piezas de plástico que sirven para acoplar el tubo de carbono que une la cola con el fuselaje. El procedimiento fue:

- Refuerzo de los estabilizadores con varillas de carbono al igual que se hizo en las alas, colocación de los servos en cada uno de los estabilizadores, instalando también la transmisión a las superficies de control, el “cubreservos”, y colocación del cableado de conexión de los servos a través de los estabilizadores para posteriormente, y mediante una soldadura, prolongarlos por dentro del tubo de carbono y conectarlos en la controladora.



Ilustración 20: Montaje estabilizadores.

- A continuación, se colocó la pieza de plástico con la que fijamos los estabilizadores al tubo de carbono.

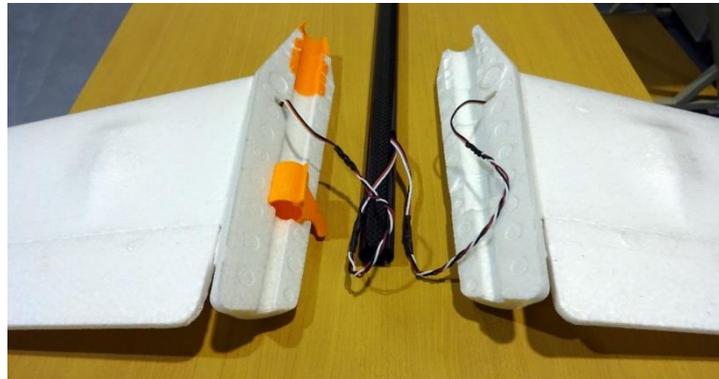


Ilustración 21: Montaje de la cola, previo al ensamblaje final.

- El paso final es pegar las dos piezas entre sí, para tener terminada la cola en forma de V. Por motivos de manejo y rendimiento, y basándonos en comentarios de otros usuarios de esta plataforma, el ángulo comprendido entre los estabilizadores que se escogió fue de 120° .



Ilustración 22: Cola terminada.

El siguiente paso es el montaje del fuselaje. Este consta de dos piezas de EPO, otras de plástico que se acoplan al tubo de carbono y unas piezas de contrachapado que van montadas en el interior de las bahías, que permiten la posterior colocación de toda la electrónica y demás componentes y dan refuerzo a la estructura. Como este RPA va a portar una cámara de fotos, se diseñó una pieza que va situada en la bahía inferior y anclada en la pieza de contrachapado que se ha de colocar, la cual fue agujereada para permitir que el objetivo de la cámara quede libre. Esta pieza permite la buena sujeción y estabilidad de la cámara y está todo pensado para que la cámara esté sobre el centro de gravedad, impidiendo así que el avión quede desestabilizado y con un vuelo inestable.

Las ilustraciones siguientes muestran dicha pieza antes de ser instalada en el RPA.

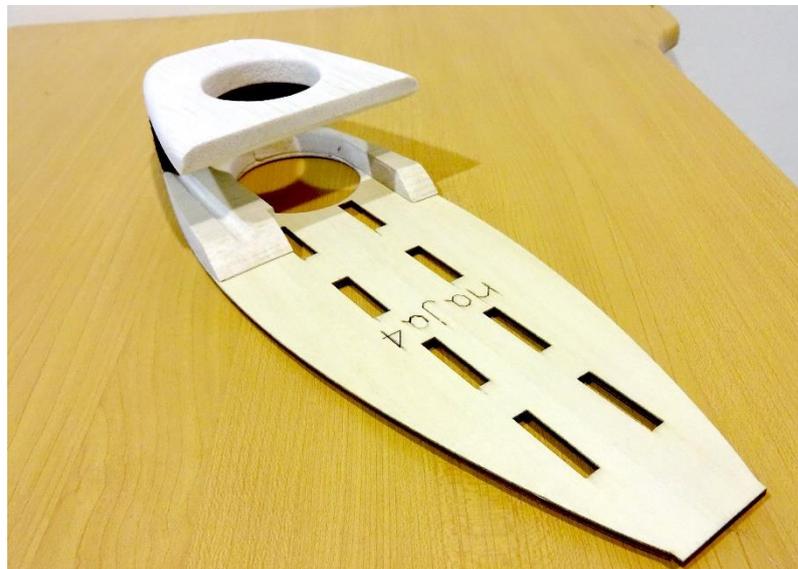


Ilustración 23: Barquito inferior.

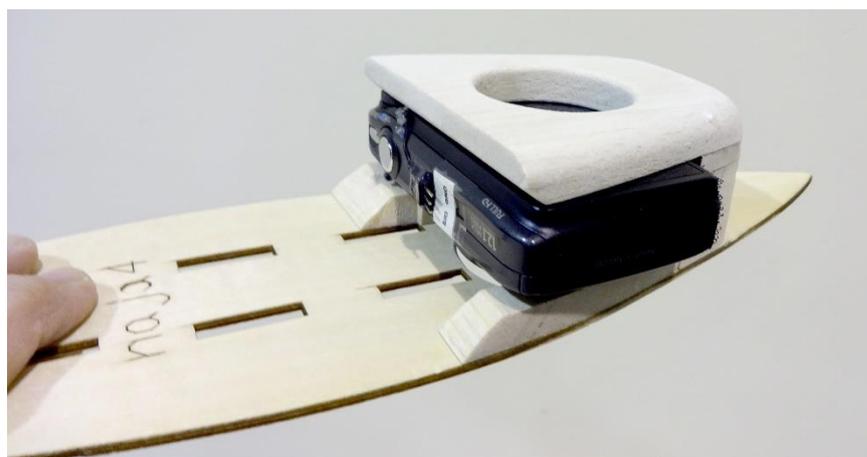


Ilustración 24: Barquito con la cámara.

Una vez terminada la pieza que transporta y asegura la cámara de fotos, se procede al ensamblaje final del fuselaje:

- Se colocan las piezas de plástico sobre el barquito de contrachapado de la bahía superior asegurándonos que quedan perfectamente alineadas.
- A continuación, se fijan los barquitos a una de las mitades de EPO, tal cual se ve en la siguiente ilustración.

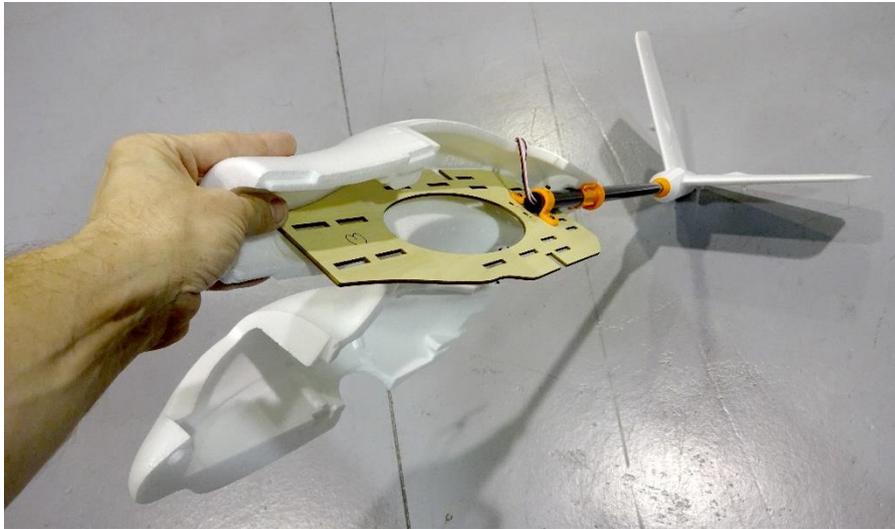


Ilustración 25: Montaje del fuselaje.

- Por último, se pegan las dos piezas de EPO y de esta forma queda montado el fuselaje.

Ahora se procede a colocar el motor, el cual va colocado en la parte delantera de la bahía superior, en el hueco que trae expresamente para él. Este va atornillado la bahía superior pero como tiene que ir conectado el variador de velocidad, situado detrás de él, se tuvo que colocar un soporte de madera en la bahía superior para permitir la fijación de este.



Ilustración 26: Variador fijado en la bahía superior.

Seguidamente, se instala el tubo de pitot, al frente de la bahía inferior. Ha de colocarse de forma que quede perfectamente alineado con la dirección de avance del avión para que las medidas que tome sean correctas. Este periférico se ha de conectar al puerto I2c de la controladora.

Por último, se coloca toda la electrónica necesaria para el vuelo autónomo. Todos los elementos han sido fijados al contrachapado para dejarlo de forma ordenada e impedir que se muevan durante el vuelo evitando así posibles desconexiones, pérdidas de control o inestabilidad en el vuelo.

La controladora se colocó en la parte intermedia de las dos bahías, en un sitio bastante inaccesible, porque al tener todas las conexiones en la cara superior, resultaba imposible situarla en la parte de arriba ya que la bayoneta que da resistencia estructural a las semialas pasa justo por el medio y no existía hueco. Además, la controladora ha de colocarse en el centro de gravedad para que los acelerómetros y giróscopos detecten bien los movimientos, por lo que se decidió colocarla de esa forma.

En la siguiente imagen se aprecia la controladora en un segundo plano, debajo de la bayoneta, todas las conexiones del zumbador, switch, receptor GPS, receptor de señal de radio, las conexiones I2C del pitot, etc.

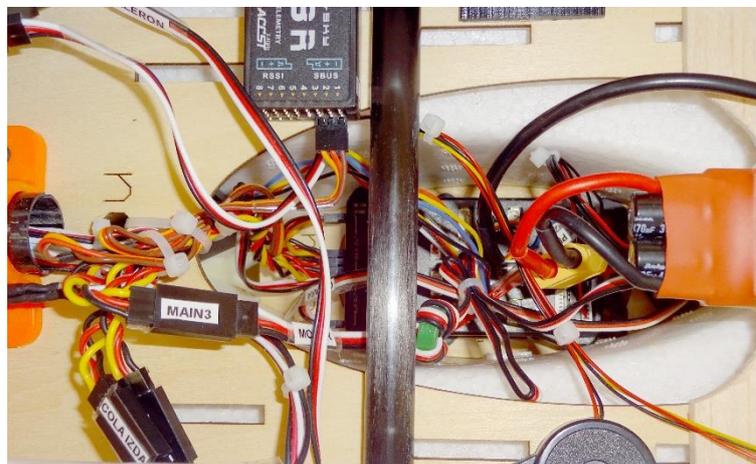


Ilustración 27: Detalle de la electrónica.



Ilustración 28: Ensamblaje del Naja terminado.

4.2. Configuración de la controladora de vuelo.

El siguiente paso después del ensamblaje y la instalación de los componentes electrónicos es la calibración de la controladora de vuelo y todos los periféricos. En este caso la controladora es una Pixhawk, controladora de la empresa 3DR. Es un hardware de código abierto con la intención de proporcionar un autopiloto de calidad, tanto para aficionados como para el ámbito profesional.



Ilustración 29: Controladora de vuelo Pixhawk

Cuenta con Acelerómetro de 6 ejes, con un giróscopo y un barómetro con precisión inferior a los 50cm.

En la parte superior de la controladora vemos todos los puertos que nos permiten conectar distintos periféricos.



Ilustración 30: Planta de la controladora.



Ilustración 31: Alzado de la cara delantera y perfil.

1. Input/output, botón de reinicio.
2. Tarjeta SD.
3. Botón de reinicio de gestión de vuelo.
4. Puerto micro-USB.

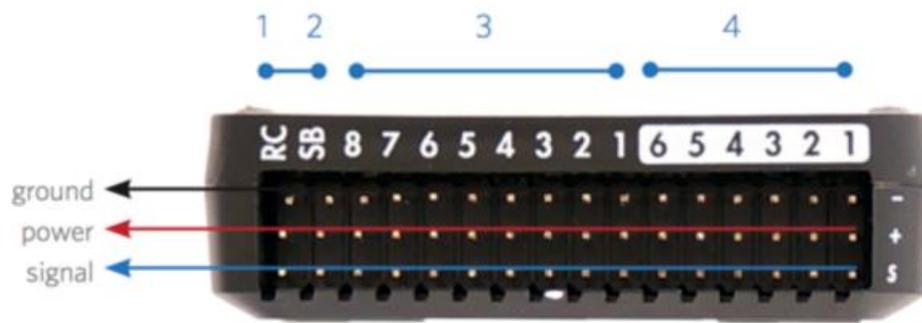


Ilustración 32: Alzado de la cara trasera.

1. Entrada del receptor de radio.
2. Salida del S.Bus.
3. Salidas Principales.
4. Salidas Auxiliares.

Para esta aeronave se utilizaron únicamente el puerto del GPS para la conexión de la antena receptora de la señal GPS, el switch de seguridad para el armado y desarmado de la aeronave, el zumbador que nos trasmite información a través de códigos sonoros, el módulo de telemetría que nos envía información sobre el vuelo y múltiples datos de la aeronave a la GCS, el puerto I²C para conectar la brújula de la antena receptora del GPS y el Pitot, y el Power Module para transmitir la energía eléctrica que necesita para funcionar desde la batería LiPo.

4.1.1. Instalación del Firmware.

En cuanto se tengan todos los elementos conectados en sus respectivos puertos, se procede a la instalación del firmware correspondiente al vehículo que estemos montando.

Para ello es necesario conectar la controladora a la CGS, pudiendo hacerse mediante un cable USB o de manera inalámbrica mediante el módulo de telemetría. En cuanto

hayamos establecido la conexión acudimos a la pestaña “Initial Setup” y se selecciona “Install Firmware” apareciendo todos los firmwares según el vehículo que estemos montando. Para este trabajo escogimos “ArduPlane V3.7.1”, firmware correspondiente a un avión o RPA de ala fija. Para instalarlo basta con hacer un clic sobre el icono y seleccionar la controladora que se esté utilizando.



Ilustración 33: Instalación del Firmware en la controladora.

4.1.2. Calibración

Una vez terminada la instalación es necesario calibrar los acelerómetros, la brújula de antena GPS y la emisora.

Para la calibración de los acelerómetros de la controladora entramos en el asistente (Wizard) de la misma ventana “Initial Setup”, y vamos siguiendo los pasos que nos va indicando. El procedimiento es simple, consistiendo básicamente en ir cambiando la posición de la controladora, poniéndola nivelada, luego poniéndola sobre su cara lateral izquierda, después derecha y así hasta completar todas las posiciones. De esta forma conseguimos hacer que la controladora identifique los valores máximos y mínimos del acelerómetro en sus 6 ejes.

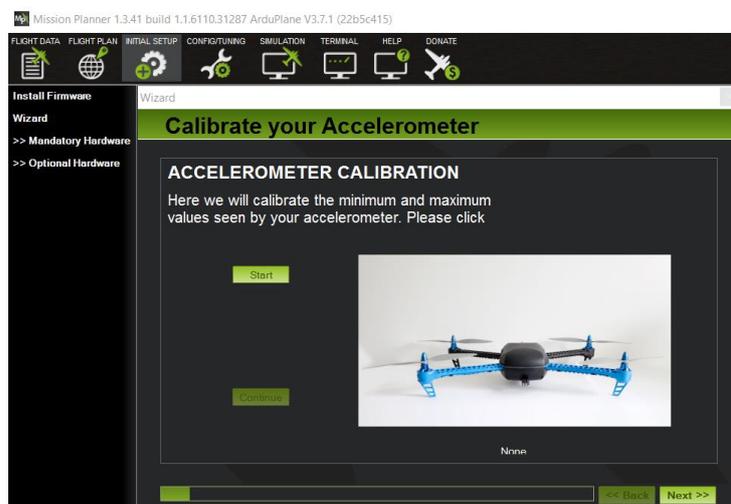


Ilustración 34: Calibración del acelerómetro.

El funcionamiento del acelerómetro consiste en que con este instrumento calibrado y totalmente nivelado, la controladora solo está sometida a la aceleración de la gravedad en uno de sus ejes, pero en cuanto la controladora se incline un cierto ángulo en alguno de sus ejes, esta fuerza de gravedad se descompone en componentes vectoriales en x,y,z. Los ángulos que se forman provocan una aceleración, que el acelerómetro medirá, y por tanto será capaz de determinar la inclinación de la aeronave.

A continuación, se calibra la brújula de la antena GPS, siendo un procedimiento muy similar al anterior con los acelerómetros.

La brújula que lleva instalada el avión, es un magnetómetro, un aparato muy sensible a variaciones electromagnéticas, y como una brújula magnética, es sensible a la variación del campo electromagnético terrestre. Por lo que con esta calibración se consigue que la brújula indique el norte y por lo tanto el RPA sepa hacia que dirección está apuntando.

Para calibrar, en la misma ventana, clicamos en “Compass Calibration”, e iniciamos la calibración. Para ello basta con mover la antena haciendo que describa una “esfera”, de esta forma, cuando se haya calibrado, será capaz de determinar la dirección del Polo Norte.

4.2. Configuración y calibración de la emisora.

La emisora que se ha usado en este trabajo es una Turnigy 9XR PRO² emparejada con un receptor FrSky X8R³.



Ilustración 35: Emisora Turnigy 9XR PRO.

² Y ² Se adjuntan datos técnicos en el punto N° 7, Documentación técnica sobre caracterización de la aeronave.

El primer paso es la creación del modelo en la emisora. Basta con encender el mando de radiocontrol y en uno de los espacios libres de la memoria, entrar y escribir el nombre que deseemos, siendo este caso NAJA. El menú de configuración tiene 13 páginas que nos permite configurar diferentes parámetros, crear mezclas e invertir canales, otras páginas más específicas para helicóptero, ajuste exponencial para el recorrido de las palancas de mando, entre otras.

Cuando tengamos creado el modelo nos dirigimos a la página número 5 del menú, cuyo nombre es "MIXER", donde asignaremos los canales a los joysticks y a los switches en función del uso que queremos darles a estos.

Para el manejo básico del avión se utilizó la configuración europea o también llamada "MODE 2", que consiste en colocar en el joystick izquierdo el mando de acelerador o Throttle (Movimiento hacia adelante más gas y hacia atrás menos) y Rudder o dirección (Joystick hacia derecha movimiento de guiñada a la derecha y viceversa), y en el Joystick derecho los movimientos de Pitch o cabeceo (joystick hacia adelante cabeceo hacia abajo y viceversa) y Roll o Alabeo (joystick hacia la izquierda alabeo hacia la izquierda y viceversa).

La asignación de los canales es la siguiente:

1. Rudder
2. Elevador
3. Motor
4. Alerón

Para la asignación de los modos de vuelo de la aeronave es necesario hacer una mezcla entre switches asignados al canal número 8, siendo el 3POS y el AIL estos switches, consiguiendo de esta forma tener seis posiciones en total, cada una emitiendo en una señal PWM diferente dentro del rango del canal 8 y configurado de tal forma que cada posición de las 6 posibles corresponda con un modo de vuelo.

Una vez estén definidos todos los canales de la emisora, se ha de calibrar la emisora. A través del Mission Planner, acudimos de nuevo a la pestaña "Mandatory Hardware" y ahí a "Radio Calibration", donde calibraremos los canales que se vayan a utilizar.

Esta calibración consiste en mover los joysticks y los interruptores, de forma que todos hagan su máximo recorrido posible. Con esto conseguimos que la controladora reconozca las señales PWM máximas y mínimas correspondientes a cada canal y correspondientes a cada posición de los controles haciendo que la controladora actúe acorde a lo que le estamos mandando desde la emisora.

En la imagen siguiente vemos el menú de calibración de la radio, y las barras cuyo contenido varía según haya más o menos señal PWM.

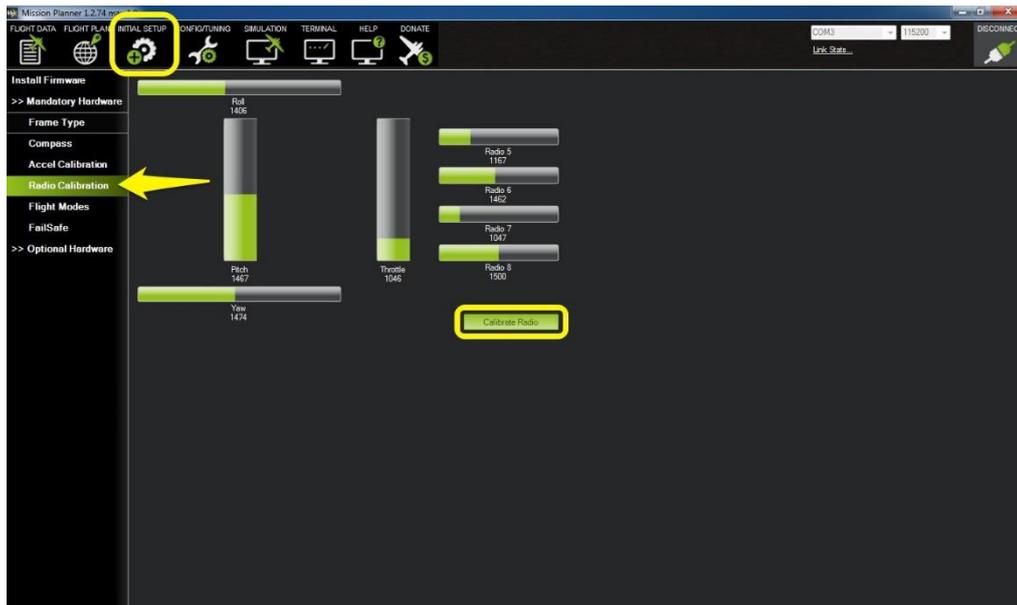


Ilustración 36: Calibración de la emisora.

4.3. Asignación de los modos de vuelo.

Siguiendo en la misma ventana, nos dirigimos al menú que está justo debajo de la calibración de la radio, al “Flight Modes”. En este menú es donde podremos asignar a cada posición de los interruptores antes configurados un modo de vuelo diferente para cumplir con las diferentes necesidades que se nos presenten.

La asignación de los modos de vuelo es la siguiente:

- **Manual:** Tenemos todo el control del RPA
- **Autopilot:** Vuela automáticamente por una ruta prefijada.
- **FBWA:** Sistema de vuelo asistido en el que se limita el cabeceo y el alabeo del aeroplano cuando accionamos los mandos, y devuelve automáticamente al avión a su posición de vuelo recto y nivelado.
- **Loiter:** Modo de vuelo en espera. El avión se pone a dar vueltas en círculos.
- **RTL:** “Return to Lunch” o “Vuelta a Casa” el avión regresara a las coordenadas de lanzamiento manteniendo una altura de vuelo constante.

4.4. Configuración de la cola en V del RPA.

Como ya se explicó en el apartado de elementos aerodinámicos, este RPA presenta una particularidad respecto a su configuración como aeronave, y es su distintiva cola en forma de V. En este apartado vamos a explicar cómo configurar dicha cola para que la controladora sea capaz de manejar la aeronave de forma óptima.

La cola en V funciona como timón y como estabilizador horizontal a la vez, por lo que requiere que las superficies de control actúen de forma simultánea para mantener el control del RPA. En nuestro caso y tal cual están definidos los canales en la emisora, la controladora ha de mezclar los canales 2 y 4 correspondientes al rudder y al elevador respectivamente.

A continuación, se muestran los movimientos que deben realizar los segmentos para controlar la actitud del avión:

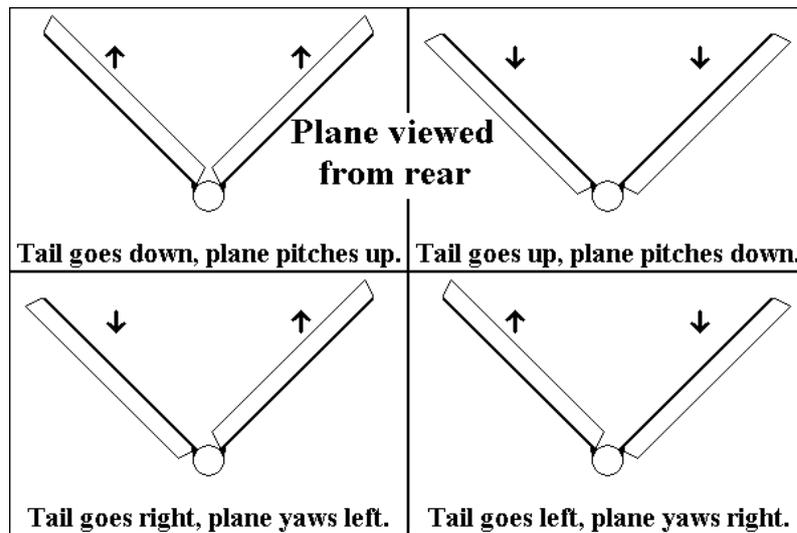


Ilustración 37: Movimientos de la cola en V.

Para realizar dicha mezcla se ha seguido el siguiente itinerario, el cual podemos encontrar en la página web de ardupilot:

- Configurar la emisora sin mezcla VTAIL.
- Dentro del “Full Parameter Tree” establecemos los valores 1 a RC2_REV y RC4_REV y KFF_RDDRMIX a 0,5
- A continuación, colocamos el comando VTAIL_OUTPUT en 1 también. Cabe la posibilidad de tener que colocar este comando con valores 2, 3 o 4.
- Mandamos a la controladora que se ponga en el modo de vuelo “FBWA” (Fly By Wira A), el cual limita la actitud de la aeronave en cabeceo y guiñada.
- Movemos el avión hacia arriba y hacia abajo comprobando como actúan las superficies de control de la cola.
- Si las direcciones de las superficies de control se mueven en direcciones opuestas, se ha de cambiar VTAIL_OUTPUT a 2 y volver a comprobar.
- Si los dos segmentos de control se mueven en la misma dirección pero la controladora corrige el movimiento en el sentido contrario, se ha de cambiar RC2_REV a -1
- Ahora alabeamos el avión hacia la derecha, observando que los segmentos de la cola deben moverse de tal forma que corrijan el alabeo devolviendo al avión a una posición de estabilización, es decir, debe moverse de tal forma que hagan girar al avión a la izquierda. Si se mueven de forma errónea hay que cambiar RC4_REV a -1
- Le decimos a la controladora que se ponga en modo manual y ajustamos las inversiones de los canales 2 y 4 para que respondan a los movimientos que se le envían desde la emisora en caso de ser necesario.

- Para finalizar, ajustamos el KFF_RDDRMIX a un valor que proporcione la cantidad de correcta de deflexión de las superficies de control para realizar giros coordinados. Este punto puede requerir de pruebas en vuelo. Se parte de un valor de 0,5.

4.5. Configuración del Pitot.

El avión soporta el uso de un sensor de velocidad aerodinámica, que puede ayudar en las condiciones de viento, vuelo lento y aterrizajes autónomos. La calibración del pitot es importante para que el avión vuele manteniendo la altitud en los modos de auto-aceleración (AUTO, CRUISE y FBWB), y también evitando que se pare con viento en contra entrando en pérdida.

Para calibrar el pitot se han seguido las explicaciones de ardupilot.com, en las que se explica el procedimiento a seguir. Existen dos métodos de calibración para el pitot, uno automático y otro manual, habiéndose utilizado para este trabajo el método automático.

El procedimiento es el siguiente:

- Dentro del menú “Full Parameter List” cambiar ARSPD_AUTOACAL a 1, confirmando el cambio clicando en “Write Params”.
- Despegamos el avión, haciéndolo volar en círculos durante 5 minutos. Esto puede realizarse en cualquier modo de vuelo, pero si el piloto automático está bien ajustado podemos hacerlo en el modo “Loiter” o “RTL” durante 5 minutos. Podemos ver el cambio en el ARSPD_RATIO, yendo de nuevo “Full Parameter List” y haciendo clic en “Refresh Params” para actualizar los valores. (Solo se actualiza si el valor varía en más del 5% respecto al último valor guardado).
- Se vuelve a poner el comando ARSPD_AUTOACAL a 0.
- Comprobamos de nuevo el ARSPD_RATIO, cuyo valor debería estar comprendido por lo general entre 1,5 y 3,0. Si no se encuentra entre estos valores es aconsejable cambiar la ubicación de tubo siempre que sea posible.

El cálculo para calcular la velocidad relativa compensa automáticamente los efectos de la densidad respecto a la altitud.

También podemos tener en cuenta, que si necesitamos mayor precisión para medir la velocidad debido a condiciones extremas de temperatura, entre los pasos 2 y 3 antes descritos, es posible ajustar la temperatura real del aire en la zona de despegue, introduciéndola en el comando GND_TEMP. Por defecto se utiliza la temperatura de la zona de encendido del avión como una temperatura de aproximación a la real del aire, pero debido al calentamiento del Sol y al eléctrico casi siempre toma lecturas más elevadas.

5. Integración de los sensores. Cámara Canon Powershot convertida a NGB.

Como ya se explicó en el ensamblaje del avión, este está modificado para transportar una cámara convertida a NGB para realizar aplicaciones cartográficas. Además de la modificación del sensor, a la cámara se le instaló un nuevo firmware conocido como CHDK de sus siglas en Inglés “Canon Hackers Development Kit” y permite a la cámara tener funcionalidades nuevas no programadas originalmente, como nuevos modos de disparo, temporizadores, time-lapse, disparo automático, guardar en RAW, etcétera.

Con toda la configuración que explicamos a continuación de instalación y configuración del CHDK, conexiones de la cámara y disparador remoto, y configuración de la controladora, haremos posible el disparo de la cámara de forma remota y automática, lo cual permitirá la definición de una misión de vuelo autónomo cartográfico.

Comenzamos instalando el firmware CHDK, que es tan simple como obtener el firmware que viene de fábrica en la cámara, y descargar el firmware CHDK correspondiente al modelo de cámara y versión de firmware. Ponemos los archivos descargados en la tarjeta SD de la cámara y, arrancando la cámara desde el visor de fotos, podemos acceder dentro del menú principal a actualizar a firmware CHDK.

El segundo paso a realizar una vez instalado el firmware CHDK, es instalarle un nuevo script (todas las funciones nuevas que permite este firmware funcionan mediante scripts), cuyo nombre es “KAP UAV Exposure Control Script”. Como ya se ha dicho este firmware se ejecuta bajo CHDK y controla automáticamente la velocidad de obturación, la apertura, el filtro ND y los ajustes ISO para mantener las velocidades de obturación rápidas necesarias en la fotografía aérea. Además, le permite activar su cámara enviando una señal PWM al puerto USB de la cámara. La configuración que necesita es simplemente escoger el modo de disparo poniéndolo en “Burst” y seleccionamos que el control de disparo a través de la conexión USB lo haga la controladora de vuelo, por lo que seleccionamos “Pixhawk” de entre las varias opciones que da. En las siguientes ilustraciones podemos ver que es bastante intuitivo el menú de configuración:



Ilustración 38: Instalación del Script KAP UAV.



Ilustración 39: Selección del control de disparo por USB.

El siguiente paso es la instalación del cableado necesario para que la controladora transmita la señal a la cámara y que esta dispare una foto cuando sea necesario.

El esquema como se verá a continuación es bastante simple, ya que solo necesitamos un cable que alimente los pines de la Pixhawk con 5V. Para eso usamos el BEC del variador, que está alimentado por la batería, por lo que desde el BEC sacamos una conexión en “Y” de manera que conectemos el variador de velocidad al puerto correspondiente al control del motor del RPA (MAIN 3) y con la otra rama alimentamos los pines de la controladora. La conexión restante es desde el puerto RC10 (ya que luego en el Mission Planer configuraremos la controladora y es necesario indicarle a donde tiene que enviar la señal) conectado al disparador remoto, el cual estará conectado por un cable, en el que uno de sus extremos será USB, a la cámara en el mencionado puerto.

A continuación, se muestra la conexión descrita y una foto del disparador:

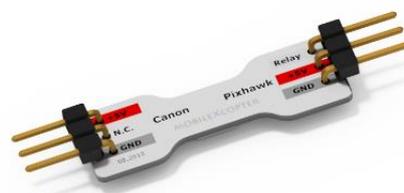


Ilustración 40: Disparador remoto.

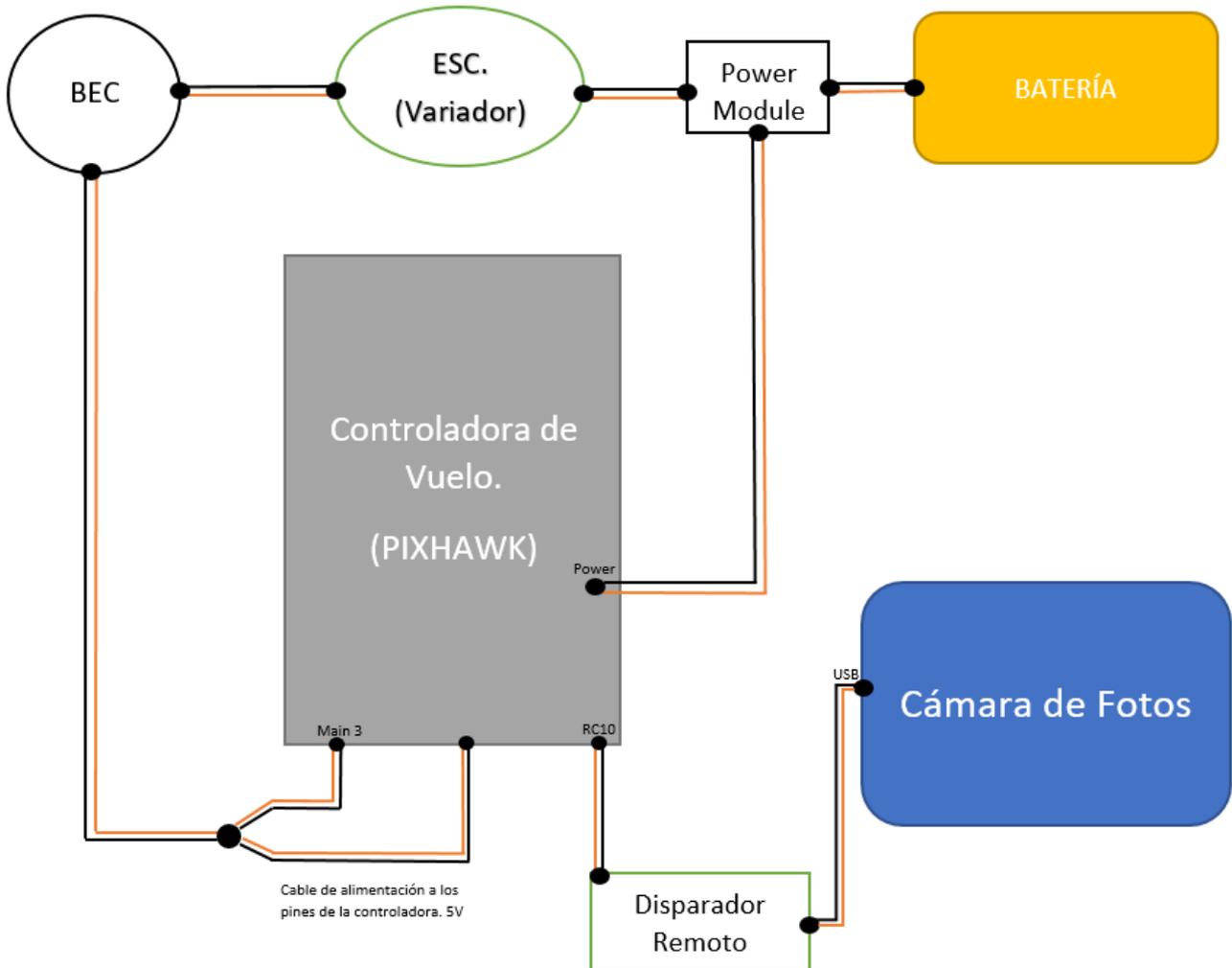


Ilustración 41: Esquema conexión Cámara-Controladora.

El siguiente paso es ajustar una serie de parámetros en la Estación de Control de Tierra para que la controladora sepa que en el puerto auxiliar RC10 tiene una cámara conectada y que la controladora tiene que actuar para ese puerto sabiendo lo que tiene.

En estos pasos que se explican a continuación se configura el disparo en función de la distancia, por defecto ya está configurado para nuestra cámara, por lo que no se ha modificado nada:

- Dentro del menú “Full Parameter List” buscamos el comando “CAM_TRIGG_TYPE” y le asignamos el valor 0, correspondiente a una señal PWM.
- Configuramos también el comando CAM_TRIGG_DIST. Con este comando podemos configurar la distancia entre cada disparo de fotos. Si el valor es distinto a 0, la cámara dispara cuando la distancia GPS recorrida sea igual al valor establecido.

- La forma de disparo o distancia de disparo puede ser activada, desactivada o modificada durante el vuelo utilizando el comando DO_SET_CAM_TRIGG_DIST.

Estos comandos mencionados para la forma de disparo que se escogió no hubo que modificarlos, ya que vienen por defecto para disparar la cámara como si fuese un servo. Si el caso fuese como un relé deberán modificarse según las necesidades.

Seguidamente, para la configuración de la cámara es necesario ir al menú "INITIAL SETUP"/"CAMERA GIMBALL". Dentro de este menú en el apartado "Shutter" seleccionamos el puerto al que se conectó la cámara a la controladora, en este caso el RC10.

Después de hacer esto volvemos al menú "Full Parameter List" y buscamos el Parámetro RC10 en el que veremos multitud de opciones que se le pueden asignar a los canales, como un tren de aterrizaje retráctil, un paracaídas de seguridad, etc. En nuestro caso tenemos que seleccionar "Trigger", que corresponde con el disparador de la cámara poniendo el número 14 que le corresponde, y guardamos los cambios para hacer efectiva la modificación.

Por último, y dentro del "Full parameter Tree" es necesario ajustar los siguientes valores:

- CAM_DURATION : 1
- CAM_SERVO_OFF : 8000
- CAM_SERVO_ON : 3000
- CAM_TRIGG_TYPE : 0
- RC10_FUNCTION : 10
- RC10_TRIM : 8000
- RC10_MAX : 32767

Comprobamos que la cámara dispara fotos cuando se le ordena desde el Mission Planner yendo a la ventana "Flight Data", armamos la controladora de tal forma que el RPA esté disponible al 100% para efectuar un vuelo, y damos en la opción "Trigger Camera Now" produciéndose instantáneamente la fotografía. Esta opción de "Trigger Camera Now" es la encargada de enviar la orden de disparo de forma automática al disparador cuando planificamos una misión para sobrevolar una zona que queremos cartografiar mediante fotografías.

6. Documentación técnica sobre caracterización aeronave.

En este apartado se muestra un ejemplo de la documentación necesaria a entregar a la AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea) para dar de alta el RPA ante las autoridades para poder realizar los vuelos que se necesiten hacer.

6.1. Descripción y Caracterización del RPA Naja de Skywalker.

6.1.1. Fabricante, modelo, números de serie de la aeronave, motor, hélices, soporte de la carga de pago y carga de pago, piloto automático, emisora de control.

TIPO DE AERONAVE	RPA de ala fija, en configuración de ala alta, con empenaje en forma de "V" positivo y 1920 mm de envergadura
FABRICANTE	Skywalker – China
Nº DE SERIE	
ESTRUCTURA DEL FUSELAJE Y ALAS	Casco en Poliolefina Expandida (EPO) de alta densidad con costillas en la mitad delantera en madera de balsa.
TIPO DE CELULA	Desmontable en dos semialas y zona central del fuselaje. Unión mediante tubos de fibra de carbono.
MOTORIZACIÓN	SUNNYSKY X3114 900KV Outrunner Brushless Motor
VARIADOR	ESC -TG Plush de 60A, 6 – 26 V con BEC de 5V – 3A
PESO EN VACÍO	1500 g
PESO MAXIMO AL DESPEGUE (MTOW)	2300g
CARGA DE PAGO	231 g
SISTEMA DE CONTROL	3DR - PIXHAWK
MOTW RECOMENDADO FABRICANTE	2300g
HÉLICE	11" / 6 "
POTENCIA MÁXIMA CONSUMIDA POR EL SISTEMA DE PROPULSIÓN	565.36 W
POTENCIA MAXIMA CONSUMIDA POR EL SISTEMA DE VUELO	2 W
RANGO DE BATERÍAS	3S – 4S
AUTONOMÍA	40 minutos
VELOCIDAD DE CRUCERO	17 m/s
VELOCIDAD DE PÉRDIDA (A MTOW) (VSTALL)	6 m/s
VELOCIDAD DE NO EXCEDER (VNE)	20 m/s
SISTEMA DE VUELO	3DR PIXHAWK, con telemetría de 433 MHz, sensor de velocidad y GPS
CARGA ALAR EN VACÍO	43,5 g/dm ²
CARGA ALAR CON MTOW	45 g/dm ²
IMU	6 EJES: 3 de aceleración y 3 giroscópicos
ENLACE DE RADIO	2,4 Ghz con codificación CSST – fabricante FrSky
RECEPTOR DE A BORDO	S8R de 8 canales con telemetría y S-Bus, fabricante FrSky
ALIMENTACION DE SISTEMA DE VUELO	Módulo de potencia (PMU) de 3DR a 12V – 3ª
CONEXIÓN Y COMUNICACIÓN INSTRUMENTOS DE VUELO	I2C

6.1.2. Planos/diagramas con dimensiones del vehículo aéreo.

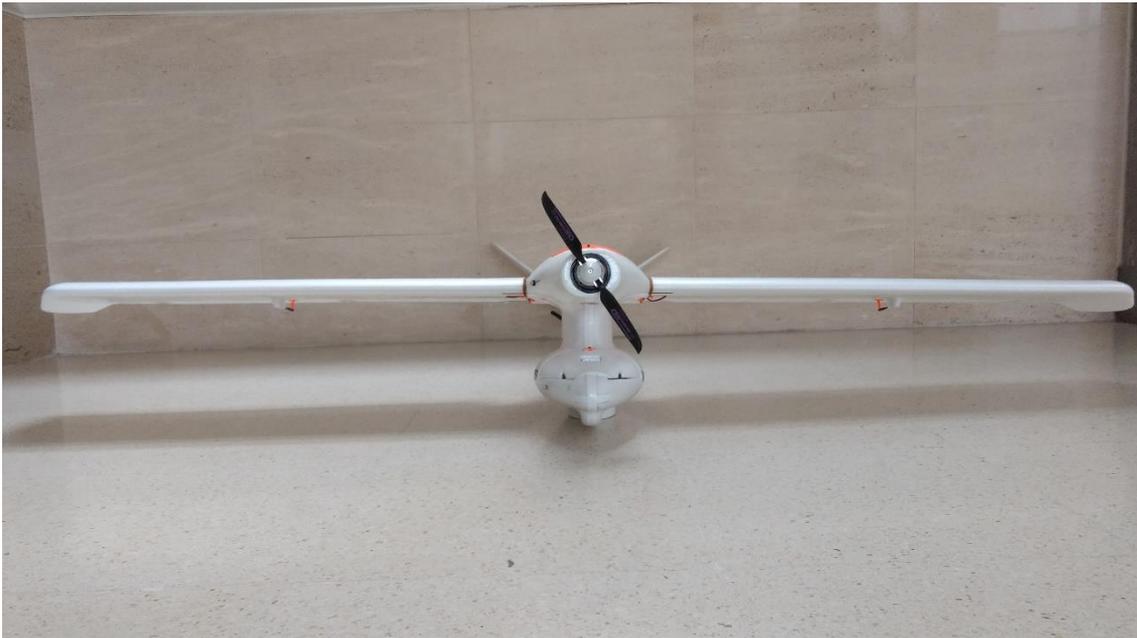


Ilustración 42: Alzado



Ilustración 43: Planta



Ilustración 44: Planta

6.1.2.1. Descripción de la aeronave.

El Naja de Skywalker es un aerodino de ala fija con una configuración un tanto peculiar al tener dos bahías de carga colocadas verticalmente entre sí, en las cuales se les coloca toda la instrumentación necesaria, con motor colocado en la parte delantera del fuselaje (“pulled”) y empenaje en forma de “V” positivo y una un ángulo de diedro entre estabilizadores de unos 120°. La estructura es de EPO (Polioléfina Expandida) tanto las alas como las bahías de carga y los estabilizadores del empenaje reforzado con contrachapado. La unión entre el empenaje y la parte delantera del RPA se hace mediante una barra de fibra de carbono.

La célula es totalmente desmontable, exceptuando el empenaje debido a las transmisiones de los servos. Las alas se dividen en dos semialas reforzadas con costillas de contrachapado en la unión al fuselaje y con una bayoneta.

El perfil alar es plano en el intradós y con un alto espesor “High Camber” lo que proporciona una alta sustentación (C_L) y una alta resistencia al avance (C_D) lo que permite vuelos estables a baja velocidad. La planta es totalmente recta, sin ángulo de diedro alguno y los dispositivos de punta alar (“winglets”) están orientados hacia abajo. La envergadura es de dimensiones considerables, 1920mm, además de ser un ala con una cuerda grande, lo que permite tener una superficie grande lo que supone tener una carga alar baja, lo que facilita un lanzamiento manual, así como el despegue y aterrizaje a baja velocidad.

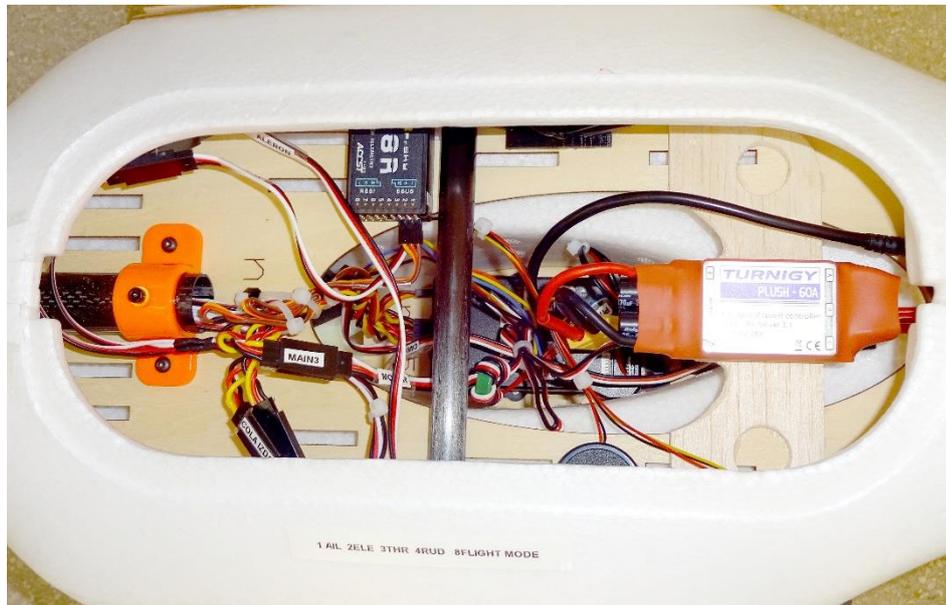
Esta plataforma de Skywalker está diseñada para el vuelo en FPV y con autonomías largas, de ahí su elevado espacio de carga. Aprovechando estas características de

espacio y estabilidad, la plataforma ha sido modificada para portar una cámara de fotos y realizar misiones de fotogrametría y conseguir cartografía digital. Para ello, en su bahía inferior se le ha practicado un agujero de unos 5 cm de diámetro, reforzando dicha perforación, además de incluir un soporte en madera, para anclar la cámara de fotos y evitar que se mueva durante el vuelo, protegiendo así a la misma y al avión evitando desestabilizaciones por variación del centro de gravedad.

Las bahías están equipadas con sendas piezas de contrachapado en las que es posible colocar toda la electrónica necesaria y su correspondiente cableado, con espacio suficiente para colocar las cosas con una disposición correcta que permita mantener el CG en el sitio que aconseja el fabricante.

El RPA está motorizado con un motor SUNNYSKY X3114 900KV Outrunner Brushless.

En las siguientes fotografías se mostrarán detalles de las partes y desmontado del equipo:



6.1.3. Listado de componentes y equipos

La relación de equipos que integran este RPA es la siguiente:

- Aeronave modelo Naja con todos los sistemas de enlace radioeléctrico y telemetría.
- Transmisor en la banda de 2,4 GHz modelo 9XR-PRO de la marca Turnigy.
- Módulo de emisión modelo XJT de FrSky con protocolo CCST en 2,4 GHz.
- Conjunto de baterías para la aeronave.
- Cámara de fotos convertida sin filtro para el espectro infrarrojo.

6.1.4. Masa del vehículo aéreo en vacío y masa máxima al despegue MTOW (incluyendo carga de pago y combustible)

La masa en vacío de la aeronave es de Incluyendo todos sus componentes. El peso máximo al despegue para el cual está configurada, conforme a las indicaciones del fabricante de la célula, es de 2,5 Kg.

La carga de pago máxima que tiene la aeronave es de, la cual permite colocar dentro de la célula la cámara de fotos convertida, cuyo peso es de

6.1.5. Descripción del piloto automático y sistema de navegación

El autopiloto utilizado en esta aeronave es un sistema profesional del fabricante 3DR conocido como Pixhawk o PX4 cuyos componentes reales pueden verse en la siguiente figura. En ella se puede apreciar la controladora de vuelo que contiene la IMU en la zona central, un zumbador, el GPS y magnetómetro, los módulos de aire y tierra de la telemetría de 433 MHz, el botón de encendido y un "Hub" de puerto I2C para la conexión de dispositivos y sensores adicionales.

En la siguiente imagen se muestra un diagrama con las conexiones del autopiloto y los sistemas empleados en esta aeronave (se han suprimido aquellos no utilizados). En el diagrama se observa como existe una PMU (Power Module Unit) que reduce la tensión de la batería principal para adaptarla al valor adecuado para el autopiloto y que deja una salida para la alimentación del variador de velocidad. Esta estructura de PMU permita monitorizar, tanto la tensión de alimentación como la corriente del sistema de propulsión.

El variador de velocidad (ESC) junto con los servos se conectan a la salida de la controladora Pixhawk que actúa sobre ellos en función del mando recibido en modo de vuelo manual o combinado con su algoritmo de control en los modos de vuelo con estabilización giroscópica o vuelo autónomo.

De los elementos mostrados en el diagrama el único que no se ha utilizado en esta aeronave es el PMM Sum Receiver. Este módulo es un codificador PPM para las salidas PWM de los receptores de radio convencionales. Puesto que el receptor empleado ha sido un receptor X8R del fabricante FrSky y presenta una salida de Smart Bus (S-BUS) se puede conectar directamente a la controladora reduciendo el número de componentes y simplificando el cableado.

Por otro lado, existe un sensor adicional que también se mostrará posteriormente que está conectado a la expansión del puerto serie. Este sensor es un tubo de Pitot para la medida de la IAS (indicated air speed). Consta de un pequeño tubo con tomas de presión estática y dinámica y un módulo electrónico que convierte la diferencia de presiones en tensión para la entrada de la señal en la controladora de vuelo. Las conexiones de GPS y brújula se realizan a los puertos respectivos para tal fin.

El interruptor con indicador luminoso permite el armado y desarmado del RPA para una manipulación más segura al garantizar la imposibilidad de que el motor se pudiera poner accidentalmente en marcha.



Ilustración 45: Sistema de vuelo Pixhawk de 3DR completo.

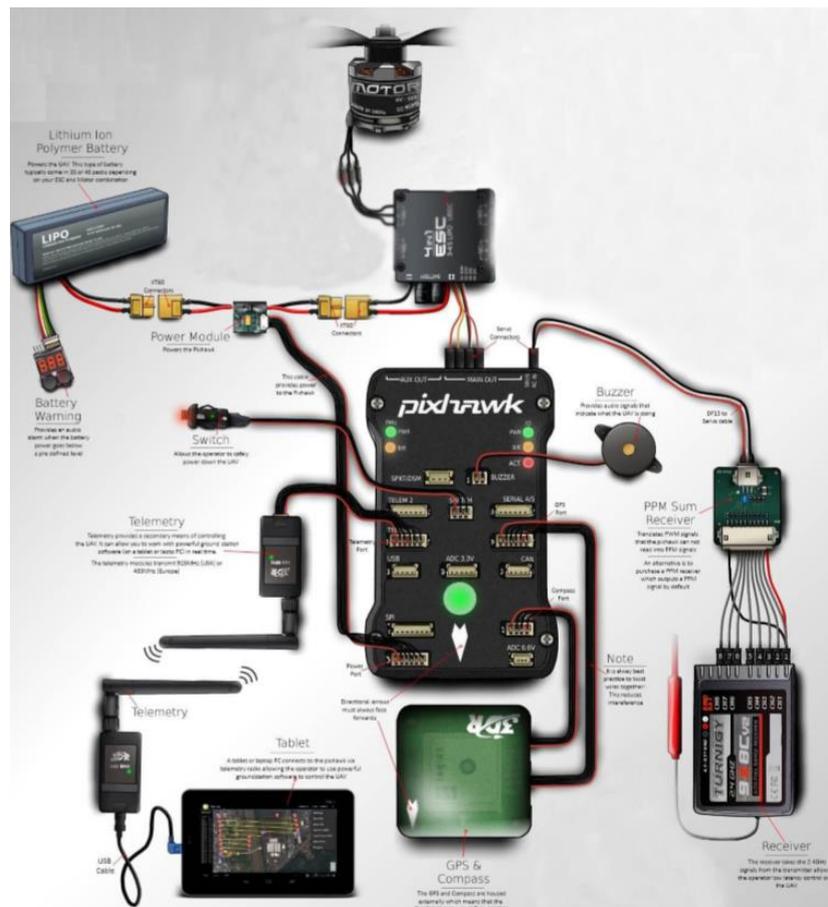


Ilustración 46: Diagrama de conexiones.

6.1.6. Descripción del software de configuración.

Todas las controladoras de 3DR son de hardware y software abierto y se configuran mediante un programa denominado Mission Planner que permite un acceso completo a todos sus parámetros, así como la programación de rutas de vuelo autónomo mediante “waypoints”. Desde este software es posible cargar también el firmware de la controladora y todas las actualizaciones que el fabricante va poniendo a disposición del usuario. La comunicación entre la controladora y el software se realiza a través de un puerto serie del PC mediante un protocolo denominado MAVLINK (Micro Aerial Vehicle Link) desarrollado por este fabricante. La siguiente pantalla es la pantalla principal del

programa en la que se observa la ubicación geográfica y un horizonte artificial, así como el estado de la controladora y todos los avisos sobre el chequeo previo al armado:

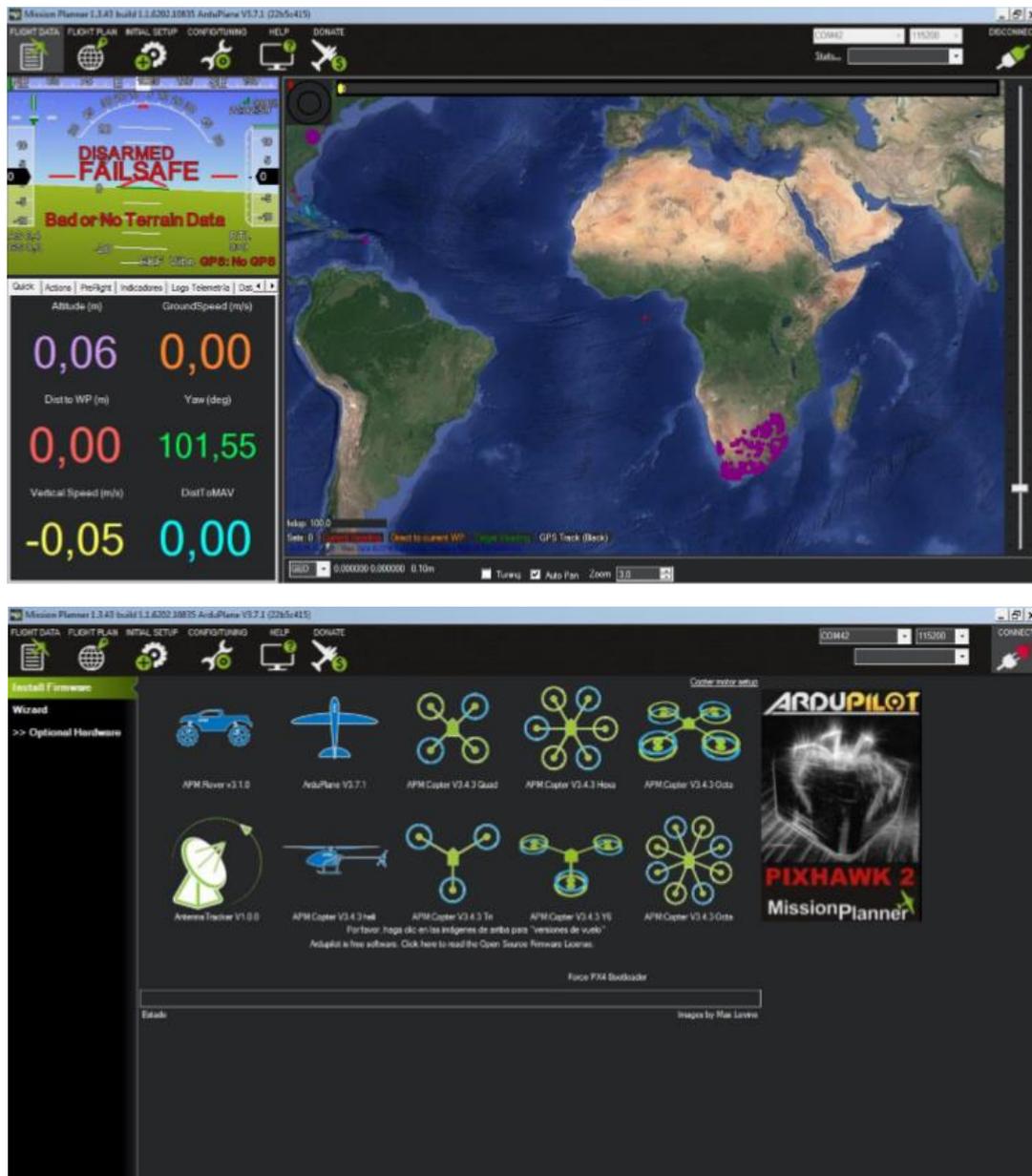


Ilustración 47: Ventana de seleccion de Firmware

Este software es quizás el más completo y abierto del mercado ya que dispone de más de 100 parámetros configurables por el usuario. Dada su extensión y complejidad no se realizará una descripción exhaustiva del mismo, sino que se mostrarán solo aquellas variables que deben ser obligatoriamente configuradas por el usuario junto con las que tienen una repercusión directa en el comportamiento dinámico del RPA.

En primer lugar, se presentará la pantalla que permite seleccionar y ajustar todo el hardware opcional que se puede instalar al autopiloto para el caso de un RPA de ala fija. En la figura se ha escogido la parte correspondiente al sensor de medición de velocidad aerodinámica por ser uno de los que el equipo lleva integrado.



Ilustración 48: Tubo de Pitot

6.1.7. Descripción del sistema de alimentación eléctrica o de combustible.

La aeronave es eléctrica y el sistema de alimentación consiste en baterías de Li-Ion-Polímero con configuración de 4 celdas en serie (tensión en carga asignada de 12,8 V). La instrumentación de a bordo se alimenta mediante una PMU (Power Module Unit) del fabricante, consistente en una fuente regulada que opera con configuraciones de 2 a 6 celdas proporcionando una salida de 5V y 3A, sobradamente dimensionada ya que el consumo del sistema de vuelo no pasa de 5W. Además, el ESC utilizado dispone, como se expondrá posteriormente de una segunda alimentación a través de un BEC conmutado capaz de suministrar adicionalmente puntas de corriente de hasta 5A.

6.1.8. Capacidad de las baterías.

Por temas de estabilidad, y mantener el Centro de gravedad ajustado, la batería escogida es una 4S de 5500 mAh, cuyo tamaño y capacidad es idóneo para la estabilidad, así como para tener una autonomía lo suficientemente amplia y cumplir así con los trabajos para los que se ha diseñado.

Para realizar vuelos seguros y proteger tanto la batería como la aeronave y todo su equipamiento, se utiliza un medidor de voltaje programable para que realice avisos sonoros cuando la batería alcanza en nivel de voltaje indicado al dispositivo.



Ilustración 49: Voltímetro con alarma sonora para el control redundante del nivel de batería.

6.1.9. Descripción del sistema de propulsión: potencia en kW

El sistema de propulsión de esta aeronave consiste en un motor SUNNYSKY X3114 900KV Outrunner Brushless Motor. La siguiente figura muestra el plano con las dimensiones del motor.

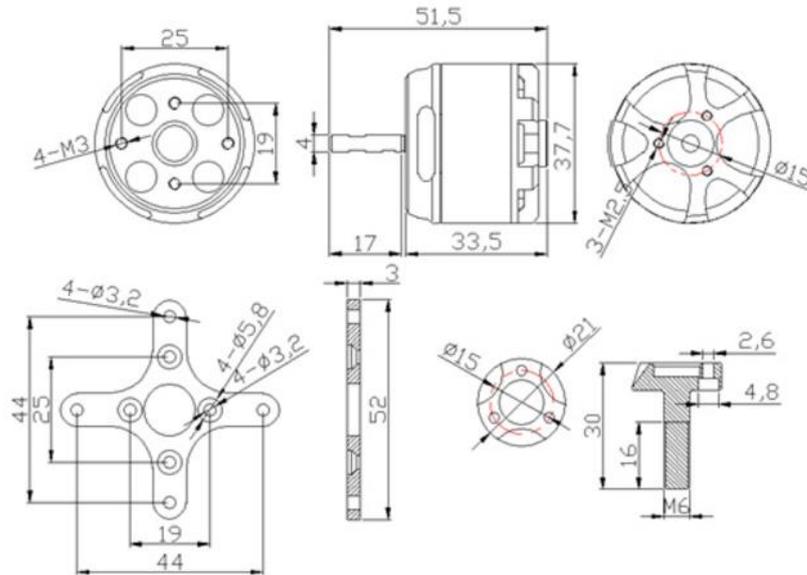


Ilustración 50: Plano del motor.



Ilustración 51: Motor Brushless.

Especificaciones técnicas el motor:

Diámetro del Estator	31mm
Espesor del Estator	14mm
Nº de Brazos del Estator	12
Nº de polos del Estator	14
Kv del Motor	900
NO-Load Current (A/10V)	1.3A
Resistencia del Motor	40 mΩ
Corriente Continua Máxima	40A/15s
Potencia Máxima Continua	600W
Peso	112g
Diámetro Exterior	37.7
Shaft diameter	4mm
Longitud	33.5mm
Longitud total del eje	51.5mm
Máxima celda de batería Lipo	3S – 4S
ESC	40A – 60A
Hélices recomendadas en pulgadas	APC 13x6.5; APC 13x8; APC 11x5.5; APC 11x7; APC 11x8; APC 12x6

6.1.10. Especificaciones técnicas del variador de velocidad (ESC)

Se ha instalado un variador de la marca Plush de 60A de la marca Turnigy, cumpliendo así con la recomendación del fabricante del motor, que recomienda un ESC de 40A – 60A.

El Turnigy Plush 60A opera desde los 7,4V hasta los 22,2V. Dispone de un BEC (sistema de eliminación de corriente) conmutado capaz de suministrar una tensión estabilizada de 5V y una corriente de 3A, lo que hace posible alimentar dispositivos con un consumo elevado.

La programación del ESC se realiza mediante códigos sonoros emitido por el propio dispositivo. Para acceder a la configuración es necesario alimentarlo teniendo el mando correspondiente al acelerador al máximo (previamente se han retirado las hélices del motor como medida de seguridad) y así, el ESC comienza a emitir una serie de sonidos. Dependiendo del tipo de código sonoro (se explica el código en su manual de instrucciones) se puede configurar:

- El freno
- El tipo de batería
- Modo de corte de motor
- Límite de corte de motor
- Modo de encendido
- Timing

- Puesta a cero
- Salida de la configuración

Dentro de estos menús existen otros submenús a los cuales se accede de la misma manera que a estos mediante el mismo sistema de códigos sonoros.

Especificaciones:

- **Peso:** 60g
- **Máxima corriente de salida:** 60A – 80A durante 10s
- **Tensión de funcionamiento:** 7,4V – 22,2V
- **Máxima salida del BEC:** 5V – 3A
- **Tamaño:** 70x31x14

6.1.11. Descripción del enlace de radio del sistema de mando y control.

El radio enlace de este equipo se realiza en la banda ISM, concretamente en la frecuencia de 2.4 Ghz. Se utiliza un protocolo de comunicación multicanal sobre 80 canales denominado CCST del fabricante FrSky.

La emisora es el modelo TG-9XR PRO que se describirá posteriormente. El módulo de salida tiene una potencia de emisión de 150mW y el receptor es un receptor de 16 canales con salidas PWM y de Smart Bus (S-BUS) mediante el cual se comunica directamente con el autopiloto.

Con el fin de reducir la probabilidad de fallo se ha equipado el RPA con uno de los receptores de 2,4 Ghz más completos y fiables del mercado, y posiblemente el más inmune a interferencias radioeléctricas. La aeronave utiliza un X8R de 16 canales con telemetría y salida S-BUS que codifica la señal de radio con el protocolo CCST, único que realiza un barrido completo en los 80 canales de la banda no licenciada de 2,4 Ghz.

El receptor se alimenta desde la PMU de la controladora de vuelo. Su alcance es de unos 1500 m aproximadamente.

El receptor incorpora telemetría de su propia alimentación, de la del RPA, indicación de la intensidad de la señal de radio, y transmite toda la información a la pantalla LCD de la emisora haciendo posible la visualización por el piloto simplemente con pulsar un botón.

El protocolo CCST reduce al mínimo la posibilidad de interferencias con otras fuentes de radioenlace o emisión y la antena que utiliza el receptor presenta 2 salidas con polarizaciones a 90° lo que permite, con una correcta instalación en la aeronave, cubrir cualquier posición del velo manteniendo el enlace radioeléctrico con la mínima atenuación de señal.

6.1.12. Descripción de la carga de pago.

La carga de pago de esta aeronave es una cámara de fotos digital, más concretamente, una Canon powershot SX610 HS. Las dimensiones son 105,5 x 61,0 x 32,7 mm y el peso 231 g (con tarjeta y batería)

La principal característica de esta cámara es que incluye GPS, lo que para realizar trabajos fotogramétricos es ideal, ya que se obtiene directamente las coordenadas del centro de la fotografía. Además, se le ha retirado el filtro infrarrojo, lo que permite captar el espectro correspondiente al infrarrojo cercano, y así realizar determinados estudios sobre las fotografías.

6.1.13. Descripción del soporte de la carga de pago

El soporte de la cámara es una estructura de madera, construida específicamente para albergar la cámara antes mencionada, adherida a una de las piezas de contrachapado que sirven de refuerzo estructural y como soporte para diferentes instrumentos de manera que la cámara enfoca hacia el suelo una vez montada en el RPA, permitiendo hacer fotos aéreas.

El soporte se diseñó para colocarlo en la bahía inferior lo más retrasado posible dentro de esta, para que quedase lo más cercano del eje que pasa por el CG y evitar descompensaciones del RPA. Se le añadió un velcro tanto a la base de la cámara como a una de las paredes del soporte para que la cámara una vez introducida en él quede perfectamente fijada y asegurada.

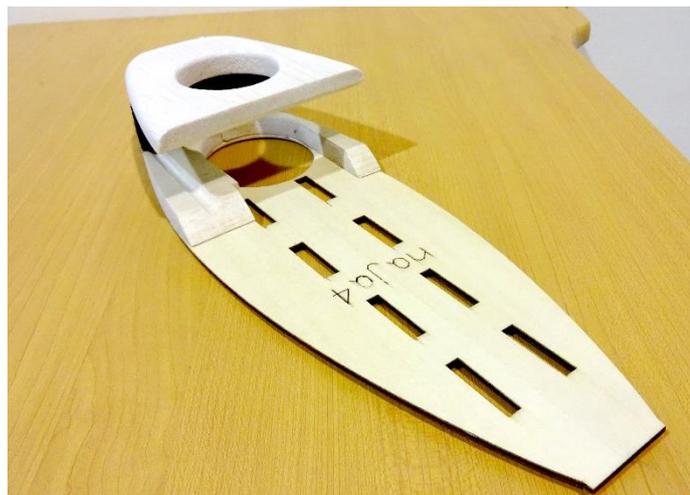


Ilustración 52: Soporte de la cámara.

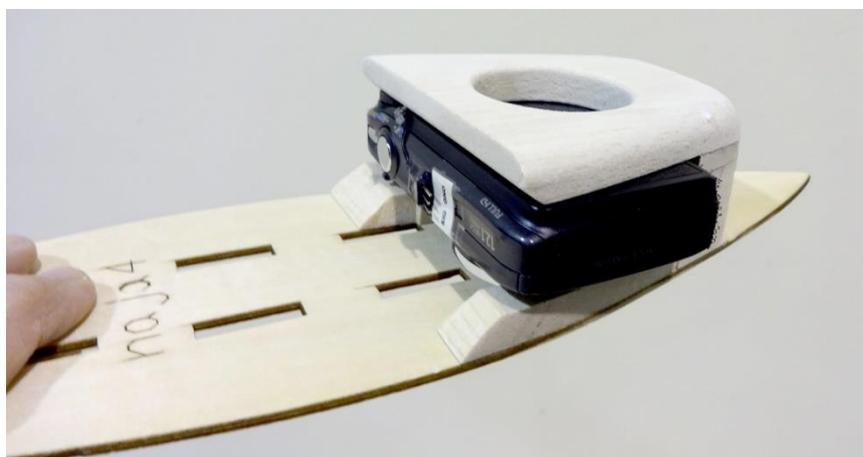


Ilustración 53: Soporte de la cámara en perspectiva.

6.1.14. Descripción del sistema de terminación de vuelo

El sistema de terminación de vuelo es el habitual en los equipos del fabricante 3DR. El armado se produce moviendo la palanca de gas hacia abajo y el centro. Si todos los chequeos de pre-armado del sistema se cumplen el motor se podrá arrancar de ese modo.

Para proceder al armado es necesario pulsar previamente el botón de seguridad que se encuentra un lateral del fuselaje y conectado al autopiloto como se mostró en el diagrama de componentes de la controladora de vuelo.

El desarmado y terminación de vuelo tiene lugar de las dos formas siguientes: mediante el movimiento inverso de la palanca de gas una vez parado o mediante la pulsación de botón referido anteriormente.

7. Conclusiones y valoraciones.

7.1. Coste total.

Componentes	Precio (€)
Plataforma: Naja Skywalker	115,85
Pack de Controladora Pixhawk con GPS, Power Module, Switch, Buzzer, Cable micro USB, Tarjeta SD de 3DR	259,00
Módulo de telemetría	32,90
ESC con BEC marca Turnigy	32,00
Motor	34,00
Hélice 11/6	9,80
Receptor de Radio Frsky	29,00
Servos digitales x 4	10,50 x 4 = 42,00
Tubo de Pitot	69,99
Emisora	98,00
Módulo Emisor Frsky	52,00
Cámara Canon Powershot 260HS	180,99
Batería LIPO 4S 5000mah 30C de la marca BrutePower	45,50
Mano de obra (€ / h)	15€ x 315h = 4.725
TOTAL	5.726,03

Aunque para determinadas personas pueda parecer demasiado dinero, el coste total al que asciende el RPA al completo, es un precio altamente competitivo con el de otras plataformas del mercado. Tiene 2 desventajas que no podemos obviar. Una es en la adquisición de la plataforma, ya que si el kit que conforma la aeronave no es de calidad puede resultarnos más complicado el ensamblaje y obtener peores resultados, lo que puede acabar acarreando gastos o complicaciones futuras que estaremos obligados a subsanar. La segunda, que no por ello menos importante, es el soporte informático que necesita la controladora, que en este caso es de código abierto. Esto a priori está muy bien, dada la libertad que ofrecen este tipo de productos a la hora de trabajar con ellos y en este caso concreto, la multitud de parámetros que permiten un gran afinamiento del RPA. Pero esta libertad en la configuración, frente a un software comercial más cerrado, puede provocar que al salir al público una actualización, ya sea del firmware del RPA o del software de la GCS, esta no sea del todo estable, debido a la casi imposibilidad de probar todos los parámetros, lo cual nos puede afectar a la hora de poner en el aire nuestro RPA, recalibrarlo o configurando otro desde cero, viéndonos obligados a esperar a que se corrija el problema y por lo tanto retrasándonos en un potencial trabajo.

En cuanto a la cámara, la utilización del Firmware CHDK abre un abanico de posibilidades enorme a la hora de trabajar con una cámara de fotos de ámbito más comercial. En nuestro caso nos permite utilizarla de forma remota, pero como incluye multitud de opciones de manejo, configuración y demás herramientas fotográficas que de serie no suelen incluir todas las cámaras, posibilita la utilización de estas de muchas formas posibles.

Como valoración final de este Trabajo Fin de Máster creo que se ha obtenido un producto final de una calidad alta, y los objetivos que se propusieron para este trabajo se han cumplido. Como opinión personal solo decir que ha sido una experiencia muy positiva a nivel académico, y he descubierto un mundo (el de los drones en general) y una potencial herramienta de trabajo un tanto complicada de entender, sobre todo al comienzo, pero a la vez muy bonita, interesante y divertida.

8. Bibliografía.

www.ardupilot.com: Página de documentación oficial de las controladoras de 3DR.

<http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>: Página oficial de los firmwares CHDK.

http://www.decamaras.com/CMS/component/option,com_camaras/Ite-mid,247/func,view/id,1569-datos-Canon-PowerShot-SX260-HS : Página de obtención de características técnicas de la cámara de fotos.

<https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2155746-Skywalker-Naja-Review>
Foro relacionado con el aeromodelismo del que se sacó información y consejos sobre el ensamblaje de la aeronave.

E. Raymond Hunt Jr, W.Dean Hively, Stephen J. Fujikawa, David S. Linden, Craig S. T. Daughtry, Greg W. McCarty. (2010). *Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring*.

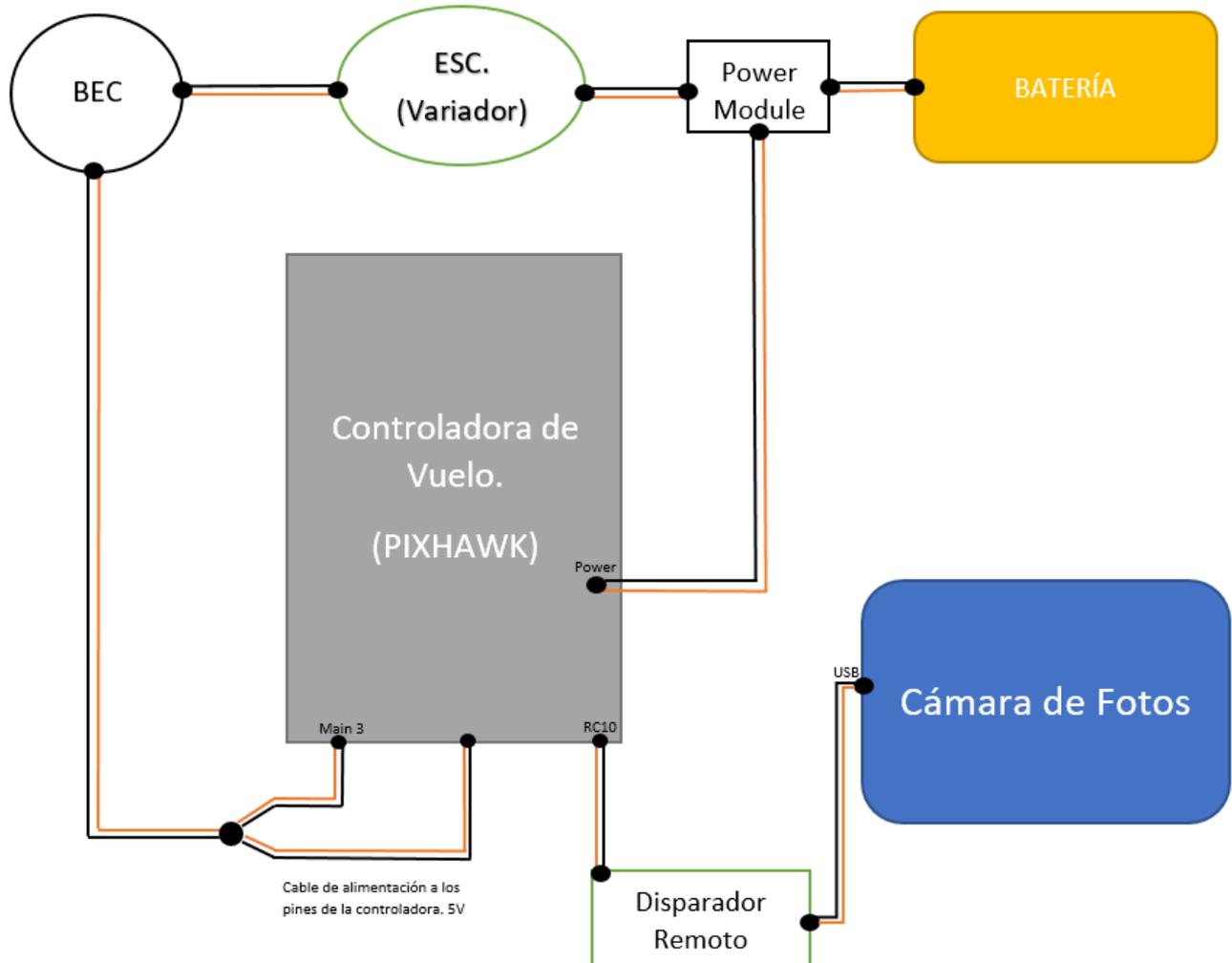
https://hobbyking.com/en_us/skywalker-naja-fpv-epo-1920mm-arf.html?store=en_us : Página web de adquisición de la aeronave.

Manés Fernández Cabanas (2017). Tema 1 RPAS de ala Fija - Fuerzas que actúan sobre la aeronave y perfiles aerodinámicos. Apuntes del Título Propio de la Universidad de Oviedo "Experto en vehículos aéreos controlados remotamente y autónomos".

Manés Fernández Cabanas (2017). Tema 2 RPAS De ala Fija - Estructura, estabilidad, ejes de movimiento y superficies de control. Apuntes del Título Propio de la Universidad de Oviedo "Experto en vehículos aéreos controlados remotamente y autónomos".

9. Anexos.

9.1. Anexo 1: Esquema de Conexión de la Controladora a la Cámara.



9.2. Anexo 2: Esquema General de Conexiones.

