Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

TRABAJO FINAL DE GRADO

ANTA:

Aeronave no tripulada autónoma de largo alcance para topografía hidrológica

Trabajo realizado por:
Alberto Díaz Delgado

Dirigido por:
Allen Bateman Pinzon

Grado en:
ingeniería de obras publicas

Barcelona, 21/01/2021

Departamento de ingeniería Civil i Ambiental

ÍNDICE

1 Abstracto 4

1.1 Resumen 4

1.2 Objetivos 4

2 Introducción 4

2.1 Definición de aeronave 5

2.2 Aeronaves de ala fija 6

2.2.1 Ventajas 7

2.2.2 Inconvenientes 7

2.3 Aeronaves de vuelo vertical 7

2.3.1 Ventajas 8

2.3.2 Inconvenientes 9

2.4 Aeronaves VTOL 9

2.4.1 Ventajas 10

2.4.2 Inconvenientes 10

3 Estado actual de la aeronáutica científica 11

3.1 Aeronaves tripuladas 11

3.2 Aeronaves no tripuladas 11

3.3 El “boom” de los multicóptero Radiocontrol 12

4 El dron multicóptero, pequeño estudio 13

4.1 Introducción 13

4.2 Mecánica de vuelo 13

4.3 Sistemas de propulsión 17

4.4 El sistema de control 19

4.5 Pruebas de campo con un cuadricóptero 22

4.6 Las Debilidades de un cuadcoptero 22

5 Propuesta alternativa: Aeronave de ala fija 23

5.1 Objetivos del vehículo 24

5.2 Digital Elevation Model (DEM) 24

5.2.1 Creación de DEMs mediante fotogrametría 25

5.2.2 Software para la generación del DEM 27

5.2.3 Prueba Agisoft Metashape en método FFCP 27

5.3 Equipo fotogramétrico de la aeronave 31

5.3.1 Selección de la Cámara 31
5.3.2 Modificaciones Azdome GS63H 32
5.3.3 El problema de los metadatos 34
5.3.4 Prueba Cámara Azdome GS63H 36
5.4 El sistema de Control de vuelo. 38
5.4.1 Mecánica de vuelo de una aeronave de ala fija 38
5.4.2 Servomotores 40
5.4.3 Ardupilot 43
5.4.4 Sistema de video de abordo 49
5.4.5 Esquema de sistemas completo 53
5.5 Sistema eléctrico de la aeronave 54
5.6 Elección del aeronave 59
5.7 Electrónicas Propulsión 61
5.7.1 Prueba de empuje 62
5.7.2 Prueba de consumo y empuje 64
5.7.3 Estimación alcance de la aeronave. 65
6 Construcción y modificaciones del fuselaje 67
6.1 Centro de gravedad y centro de presión 67
6.2 Distribución de los componentes en el fuselaje 69
6.3 Modificaciones del avión 71
6.3.1 Modificaciones del interior del fuselaje 71
6.3.2 Sistema de sujeción de las alas 76
6.3.3 Carlinga 79
6.3.4 Soporte antena GPS y cámara. 82
6.3.5 Servomotores. 84
6.4 Finalización de la aeronave 86
6.5 El nombre: ANTA 88
7 Pruebas de vuelo del avión ANTA 88
7.1 Consideraciones previas 88
7.2 Sitio de vuelo 88
7.3 Planificación del vuelo 89
7.4 Realización del vuelo. 91
7.5 Análisis post-vuelo 92

7.6 DEM de Arcalís 93
7.7 Comprobación de la precisión del DEM generado 93
8 Conclusiones 95
8.1 La aeronave 95
8.2 El DEM 95
8.3 Posibilidades de mejora 96
8.4 Conclusión 97
9 Agradecimientos 98
10 Bibliografía 99
10.1 Páginas Web 99

1 ABSTRACTO

1.1 RESUMEN

Actualmente existe una gran diversidad de vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como “drones”. Prácticamente todos los “Drones” avanzados que se ofrecen en el mercado son del tipo “cuadricóptero”. Esto presenta una serie de limitaciones. En este proyecto exploraremos e intentaremos solventar muchas de estas limitaciones mediante la construcción de un prototipo de tipo “ala fija”.

En el primer apartado realizamos una introducción y definición de la aeronave, y otros conceptos relacionados que harán de cimiento para entender con claridad la tesis completa.

En los apartados 3 y 4 analizamos cual es el estado actual de la aeronáutica científica. En el apartado 4 nos centramos en el tipo de aeronave al cual queremos desarrollar una alternativa. Estudiando con detalle su funcionamiento, partes puntos fuertes y debilidades.

A partir del apartado 5 en adelante empezamos a tratar la propuesta de la tesis. La aeronave de ala fija como alternativa a la de vuelo vertical existente. Tratamos desde los métodos geográficos que vamos a utilizar como el diseño construcción y análisis del vehículo.

1.2 OBJETIVOS

- Construir una aeronave-prototipo funcional para su uso en topografia hidrologica
- Vuelo autonomo
- Que su alcance sea, como minimo, de 5 km
- Realización un levantamiento topografico en una zona determinada
- Coste inferior a 600€

2 INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la aviación, fue evidente su enorme potencial dentro del ámbito de la investigación científica. El punto de vista aéreo combinado con la velocidad y alcance de los vehículos aéreos es una excelente herramienta de trabajo en los campos de la topografía, meteorología, geología, hidrología y otras aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, cabe mencionar que el elevado coste asociado a la aviación siempre ha limitado las distintas aplicaciones científicas, limitando por tanto su potencial de desarrollo. La aviación implica diversos costes que incluyen entre otros la aeronave, el pilotaje, el consumo de combustible, etc. La considerable inversión en infraestructuras, equipos y personal especializado ocasiona que los proyectos lleven asociados altos presupuestos. En concreto, son especialmente sensibles a esta limitación económica, aquellos proyectos que requieren un elevado número de vuelos, tales como los que en su diseño experimental incluyen un elevado número de mediciones aéreas. Con el fin de reducir costes, se suele reducir o minimizar el número de vuelos a realizar, lo que puede impactar en la calidad del diseño del estudio.

Figura 1: Blériot XI uno de las primeras aeronaves competente

2.1 DEFINICIÓN DE AERONAVE

Es importante establecer las características que definen a una aeronave y enfatizar en lo que es y que no es una aeronave.

De acuerdo con su definición, una aeronave es cualquier vehículo capaz de navegar por el aire o, en general, por la atmósfera de un planeta. Según la OACI, aeronave es «toda máquina que puede desplazarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones de este contra la superficie de la tierra».

Contrarresta la fuerza de la gravedad mediante el uso de la elevación estática o mediante el uso de la elevación dinámica de un perfil aerodinámico o, en algunos casos, mediante el empuje vertical de los motores a reacción. Los ejemplos más comunes de

2: Zepelín: Aeronave más ligera que el aire

aeronaves son los aviones, helicópteros, dirigibles, planeadores y globos aerostáticos.

Es importante considerar dos conceptos claves de la definición:

- vehículo
- Genera sustentación en la atmosfera mediante algún método

Para el interés de este trabajo omitiremos todas las aeronaves menos densas que el aire (globos aerostáticos, zepelines…) dado que su tamaño, poca controlabilidad, alto mantenimiento, muy limitada capacidad de carga y baja velocidad no los hacen dignos de consideración.

Según el método con el cual genera sustentación lo podemos definir en dos grandes grupos, que realmente, tienen poco a ver el uno con el otro.

Cuando nos referimos a sustentación nos referimos a la fuerza que genera un estado de equilibrio entre las fuerzas que produce la aeronave en sentido ascendente y la fuerza de la gravedad en el caso de vuelo estable (sin variación de altitud). En el caso de que la aeronave no esté acelerando ni frenando, es decir, que mantenga su velocidad; La resistencia y la tracción son iguales.

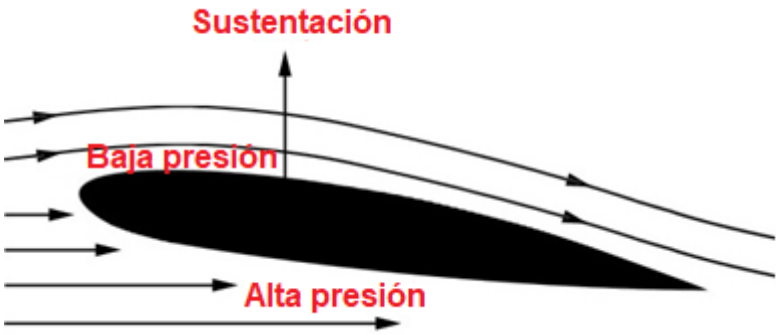
o

3. Diagrama fuerzas en una aeronave

2.2 AERONAVES DE ALA FIJA

Son aeronaves más pesadas que el aire. Para su elevación producen fuerzas aerodinámicas a través de superficies sustentadoras las cuales producen

Bernoulli a través de la forma del ala y la velocidad del viento pasando a través de esta.



4: Diagrama de flujo en una sección de ala

5. Supermarine Spitfire, un ejemplo de aeronave de ala fija

2.2.1 Ventajas

- Bajo coeficiente de fricción
- Capacidad de alcanzar grandes velocidades
- Alta eficiencia en vuelo
- Gran alcance
- Alta capacidad de carga

2.2.2 Inconvenientes

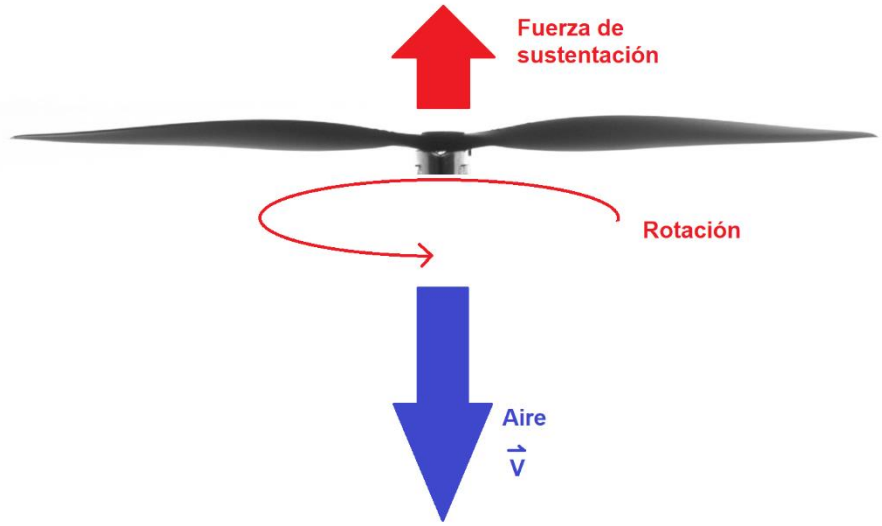
- Necesidad de infraestructura para realizar despegues y aterrizajes
- Imposibilidad de permanecer estacionario en el aire (velocidad = 0) *
- Áreas de maniobra grandes
- Tamaño generalmente elevado

**Existen aeronaves de ala fija con capacidades de vuelo vertical o VTOL, se trata de un caso especial que discutiremos más adelante. También es posible vuelo estacionario con una aeronave de ala fija en caso de que la velocidad del viento sea la suficiente como para permitir la sustentación. Se trata de un caso muy concreto y no es necesario tenerlo en consideración.*

2.3 AERONAVES DE VUELO VERTICAL

Una aeronave de vuelo vertical es un tipo de aeronave que genera la sustentación mediante el impulso aerodinámico que produce una o más hélices, rotores, o alas rotativas. Normalmente estos elementos rotan mediante la acción de uno o varios

motores. La sustentación proviene del efecto de acción-reacción que producen los mismos elementos rotativos al impulsar el volumen de aire



6. Diagrama de fuerzas en una hélice en una aeronave de vuelo vertical

7. Eurocopter EC-145 un ejemplo de aeronave de vuelo vertical

2.3.1 Ventajas

- Capacidad de permanecer estacionario en el aire indefinidamente
- Áreas de maniobra muy pequeñas
- Capacidad de aterrizaje en prácticamente cualquier sitio
- Mucha estabilidad en vuelos a baja velocidad

- Tridimensionalidad del desplazamiento (capacidad de volar de lado, hacia atrás…)

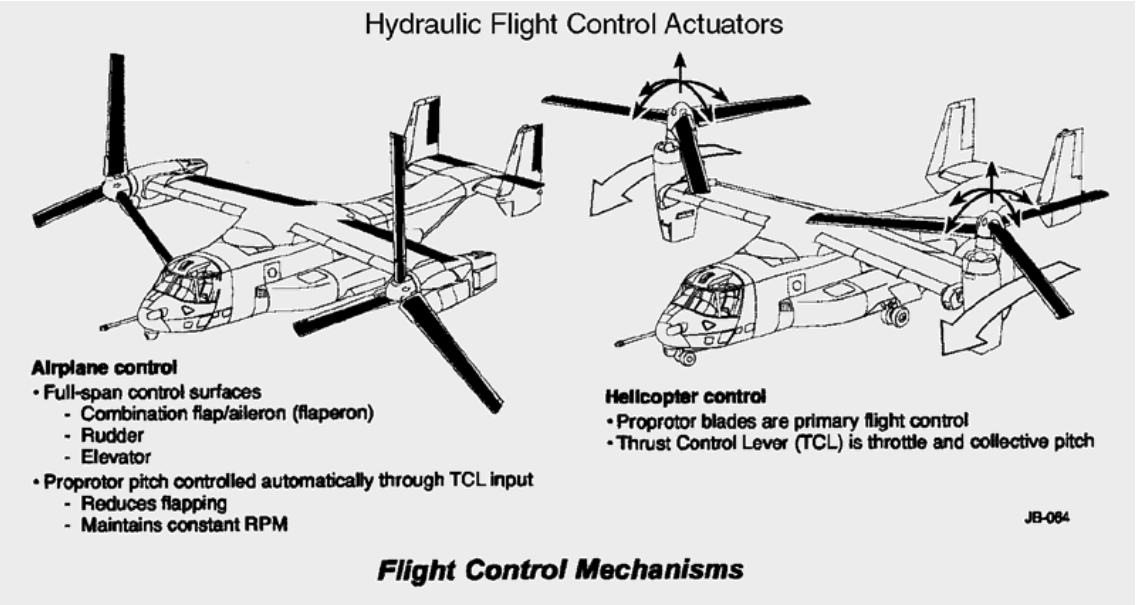
2.3.2 Inconvenientes

- Baja eficiencia de vuelo
- Velocidad máxima muy limitada
- Coeficiente de fricción elevado
- Alcance limitado
- Capacidad de carga limitada

2.4 AERONAVES VTOL

Este tipo de aeronave combina los dos tipos de aeronaves citados en 1.2 y 1.3. Una aeronave con capacidad de volar mediante la sustentación alar y poder redirigir sus motores con tal de poder realizar vuelos verticales. Todo y que parece la aeronave definitiva también van acompañadas de desventajas severas

8: Bell Boeing V-22 Osprey ejemplo de aeronave VTOL. En la foto en configuración de vuelo vertical



9: Diagrama de conversión de vuelo vertical a vuelo con ala fija de un Bell Boeing V-22 Osprey

2.4.1 Ventajas

- Áreas de maniobra muy pequeñas
- Capacidad de aterrizaje en prácticamente cualquier sitio
- Mucha estabilidad en vuelos a baja velocidad
- Tridimensionalidad del desplazamiento (capacidad de volar de lado, hacia atrás…)
- Capacidad de alcanzar grandes velocidades
- Decente eficiencia en vuelo
- Buen alcance

2.4.2 Inconvenientes

- Coste muy elevado
- Complejidad mecánica elevada
- Coste operacional muy elevado
- Sus capacidades de vuelo vertical y vuelo de ala fija se ven severamente limitadas
- Diseño con muchos compromisos
- Carga limitada a su capacidad de vuelo vertical
- Capacidad de carga muy limitada
- Peso elevado

3 ESTADO ACTUAL DE LA AERONÁUTICA CIENTÍFICA

3.1 AERONAVES TRIPULADAS

El uso de aeronaves tripuladas está bastante extendido en el ámbito de la fotogrametría. Estos aviones tienen un gran alcance en comparación con modelos no tripulados, pero requieren una gran infraestructura para ser utilizados; Helipuertos, Aeropuertos… Además, requieren una enorme inversión monetaria ya que el precio de una aeronave apta para estos trabajos no suele ser barata. Analizaremos una aeronave bastante popular en trabajos de fotogrametría: “Beechcraft Baron”

Beechcraft Baron 58P

Fabricante: Beechcraft

Introducción: 1961

Coste por unidad: 1.486 Millones de Dólares

Máximo peso en el despegue: 2313 kg

Velocidad de crucero: 330 km/h

Alcance: 1745 km

Altitud máxima: 6000 m

Como podemos ver el precio de 1.486.000$ lo hace una inversión de difícil justificación. Todo y eso los elevados costes no se quedan aquí; si miramos el precio operacional del mismo avión, el cual es 126 €/h solo en combustible vemos que requerimos de un gran financiamiento para realizar vuelos de este tipo.

Este es un problema que se da con todas las aeronaves tripuladas en este sector, esto ha generado que la mayoría de los trabajos de este tipo se realicen con aeronaves no tripuladas.

3.2 AERONAVES NO TRIPULADAS

Al contrario de las aeronaves tripuladas (ANT), este tipo de aeronave no requiere un piloto físico montado en la aeronave, El control de esta se realiza a distancia mediante una estación base o la aeronave vuela autónomamente sin necesidad de ningún "input" humano. Este simple hecho hace que, la aeronave al no tener que llevar ningún humano, no tiene que llevar ningún sistema de soporte vital, control, instrumentación para el piloto ni habitáculo para el piloto. además, los vuelos no requieren de un piloto dentro de la aeronave lo cual hace que la hora de vuelo sea muchísimo más barata. También pueden ser lo pequeñas que se necesiten ya que no están limitadas al tamaño de un humano. Por lo tanto, suelen ser modelos de tamaño más reducido que sus equivalentes tripulados con costes de operación y compra extremadamente más bajos

10: General Atomics MQ-1 Predator ejemplo de una ANT militar

3.3 El "boom" de los multicóptero Radiocontrol

11: DJI Phantom 4 RTK, dron profesional comercial

En las últimas décadas, avances en tecnología radiocontrol, avances en tecnología de motores trifásicos de pequeña escala y miniaturización de acelerómetros, giroscopios y sensores GPS han permitido el desarrollo y asequibilidad de vehículos de tipo "Multicóptero" (más detalles en apartado 3). Una gran oferta de este tipo de vehículos ha hecho su precio muy asequible y su rango va desde pequeños juguetes hasta unidades profesionales que pueden cargar equipos de precisión, como unidades GPS-RTK, Cámaras para fotogrametría, LIDAR etc.

Podemos observar que se tratan de aeronaves de vuelo vertical.

Su reducido coste comparado con aeronaves tripuladas lo hacen una herramienta atractiva y su elevada capacidad de carga lo hacen vehículos capaces para trabajos que requieren trabajos aéreos.

Todos estos puntos a favor han masificado su uso en el campo científico-tecnológico. Raro es encontrar un departamento de topografía sin uno o varios de estos vehículos

4 EL DRON MULTICÓPTERO, PEQUEÑO ESTUDIO

4.1 INTRODUCCIÓN

Según lo estipulado en el apartado 2, podemos clasificar los multicóptero como Vehículos de vuelo vertical no tripulados. Eso significa que tiene todas las ventajas e inconvenientes de un vehículo de vuelo vertical. Su tipo de vuelo lo hace idóneo para trabajos en parcelas o áreas de tamaño limitado, como en el estudio de infraestructuras, edificios etc. Pero el campo de la hidrología rara vez trabaja en elementos pequeños y de baja extensión; sobre todo en el estudio de ríos, los cuales son elementos lineales de largas extensión. Este tipo de trabajos es justo la debilidad de los vehículos de vuelo vertical. Brillan en trabajos en zonas “enjauladas” dado a su gran capacidad de movimiento en todas direcciones y realmente le falta capacidad a la hora de recorrer eficazmente largas distancias donde su capacidad de movimiento en todas direcciones no supone una ventaja ya que el vuelo se realiza constantemente en una única dirección y su capacidad de permanecer estático en el aire no supone ninguna ventaja.

En los siguientes apartados realizaremos un pequeño estudio sobre las capacidades de un cuadricóptero comercial actual; en concreto el modelo del fabricante “Fimi”: el “Fimi A3”. Este pequeño estudio lo realizaremos para tener un referente al cual comparar el estado actual con el vehículo desarrollado en este proyecto

12: Fimi A3

4.2 MECÁNICA DE VUELO

Antes de explicar cómo funciona un cuadricóptero, hay algunos conceptos importantes que debemos definir: cabeceo, guiñada y balanceo. Estos términos se refieren a las

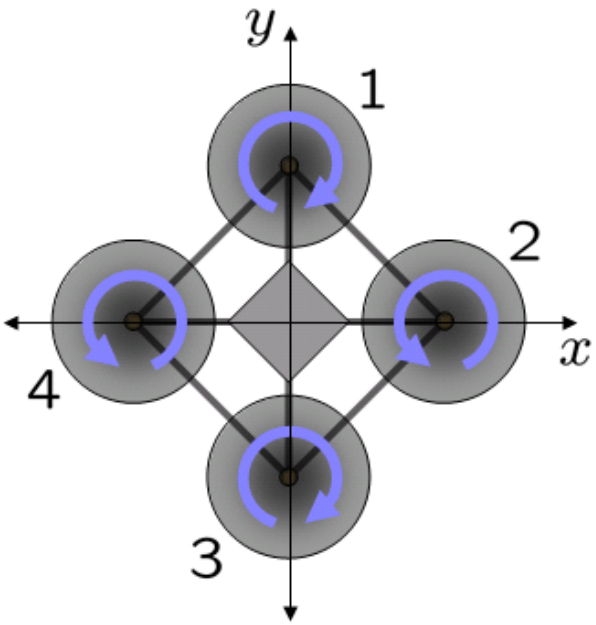
tres dimensiones en que un avión en vuelo es libre de mover-se. Estos términos no solo se aplican a cuadricópteros también se aplican a el resto de los tipos de aeronaves

Cabeceo: El cabeceo se refiere a la punta de la aeronave que sube o baja.

Guiñada: La guiñada, se refiere a la nariz del avión girando a la izquierda o derecha.

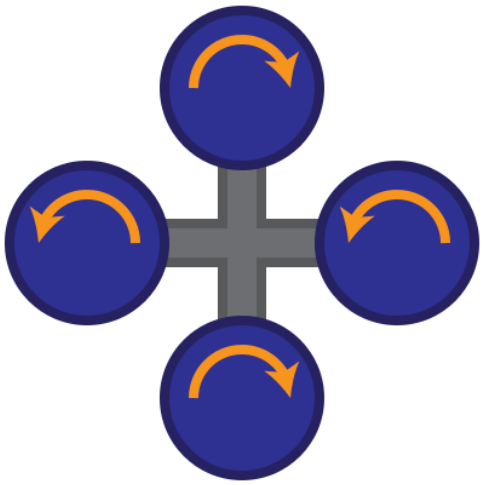
Balanceo: El balanceo es el giro a través de un eje que va desde el morro de la aeronave hasta la cola de esta.

Los cuadricópteros, como indica su nombre, hacen uso de 4 motores. Dos de estos motores giran en sentido horario mientras que los otros dos giran en sentido antihorario. Los motores en el mismo eje giran en la misma dirección, como se ilustra aquí.



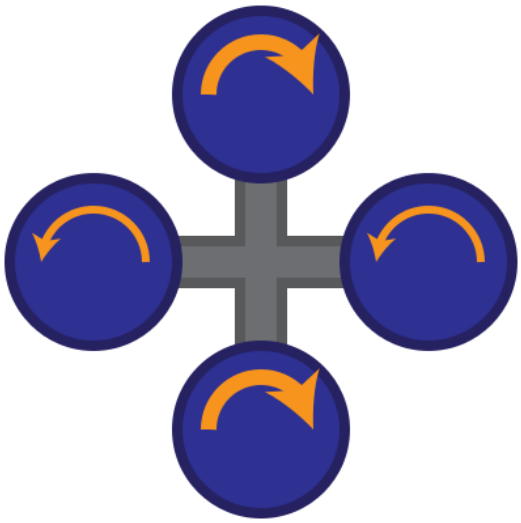
13: Dirección de giro de los rotores de un cuadricóptero

El cambio de altitud se refiere únicamente a subir o bajar la aeronave respecto un punto. Un cuadricóptero puede ajustar su altitud aplicando el mismo empuje a los cuatro rotores.



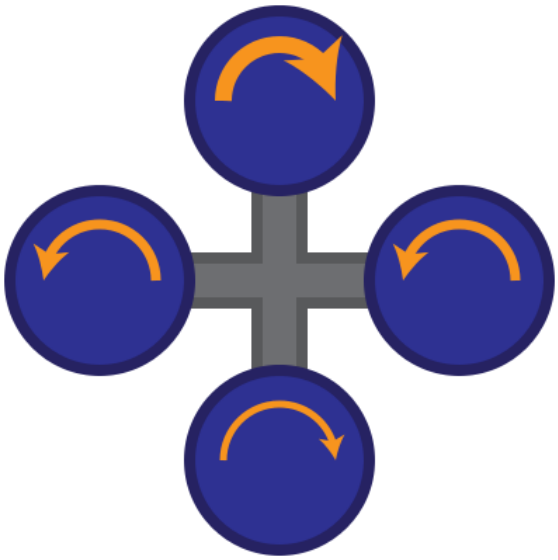
14: Cuadricóptero cambiando su altitud

Para ajustar su guiñada, o hacer que gire hacia la izquierda o hacia la derecha, el cuadricóptero aplica más empuje a un conjunto de motores. Por ejemplo, un cuadricóptero puede aplicar más empuje a los dos motores que giran en sentido horario para girar. Esto hace que dado que el empuje que producen las cuatro hélices sigue siendo simétrico e igual en su sumatorio total no cambia de altitud, cabeceo o balanceo mientras cambia su guiñada



15: cuadricóptero ajustando su guiñada

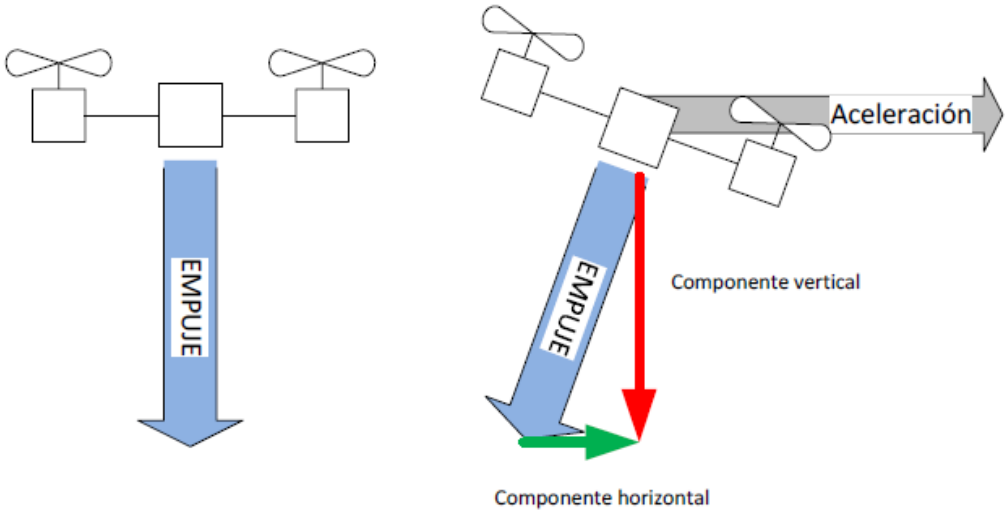
El cabeceo y balanceo, por otro lado, se ajustan aplicando más empuje en un rotor y menos en el otro rotor opuesto. Por ejemplo, el cuadricóptero puede ajustar su inclinación aplicando más empuje al motor de giro en sentido horario en la parte delantera y menos empuje al motor de giro en sentido horario directamente opuesto en la parte posterior.



16: Cuadricóptero cambiando su cabeceo

Una cosa que hace que los cuadricópteros sean fáciles de volar es que en realidad no tiene que ajustar las velocidades del motor manualmente, ya que aquí es donde entran el controlador y la electrónica. Discutiré la electrónica y los sistemas de control en el apartado 3.3, por ahora vamos a ver cómo funcionan los motores.

Como aeronave de vuelo vertical que es para acelerar hacia una dirección lo hace inclinándose hacia la misma



17: Fuerzas de empuje en un multicóptero en reposo y acelerando

Dado que en el segundo caso el sumatorio de fuerzas horizontales no es cero, se produce aceleración.

4.3 SISTEMAS DE PROPULSIÓN

En este apartado explicaremos cuales son y cuál es la función de los diversos componentes del cuadricóptero que realizan el trabajo mecánico por tal de que la sustentación sea posible.

Motores

La mayoría de los cuadricópteros usan motores trifásicos.

Los motores trifásicos consisten en un rotor con un imán permanente y una serie de electroimanes que lo rodean, también llamados polos. Los motores trifásicos pueden tener de 2 a 14 polos

Los motores trifásicos tienen tres cables, o fases, Estos cables controlan los motores con tres frases, de ahí que se llamen “trifásicos”. Al cambiar las conexiones en estos cables, puede hacer que el motor gire en sentido horario o antihorario.

18: Motor trifásico para un cuadricóptero

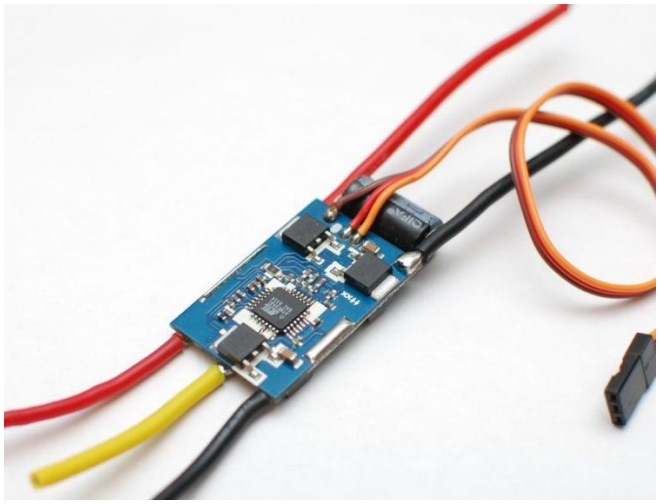
Una de las especificaciones clave de un motor cuadricópteros es su clasificación de KV. KV no representa kilovoltios, sino que es una clasificación del número de revoluciones por minuto (RPM) que el motor girará cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 voltio al motor sin carga. KV también puede considerarse como RPM / voltio. Las clasificaciones típicas de KV para cuadricópteros son entre 500 y 2500 KV. Un motor de KV bajo puede hacer girar una hélice grande y, por lo tanto, crear una mayor cantidad de empuje.

Como regla general, los cuadricópteros que pesen más de 1 kilogramo utilizarán un motor en el rango de 700 a 900 KV.

La máxima corriente nominal del motor es otro factor importante. Este valor, medido en amperios determina el consumo de este y su variador trifásico (ESC) a utilizar.

En resumen, cada motor individual debería ser capaz de proporcionar un empuje igual a la mitad del peso de todo el cuadricóptero. En otras palabras, un cuadricóptero de 1 kilogramo requiere cuatro motores, cada uno capaz de al menos medio kilogramo de empuje.

Controladores electrónicos de velocidad (ESC (Electronic Speed Controller))



19: Controlador Electrónico de Velocidad (ESC)

El ESC es el dispositivo que controla los motores trifásicos. Mientras que la batería proporciona corriente continua, este tipo de motores requieren corriente alterna de tipo trifásico y es el trabajo de los ESC de generar este tipo de corriente.

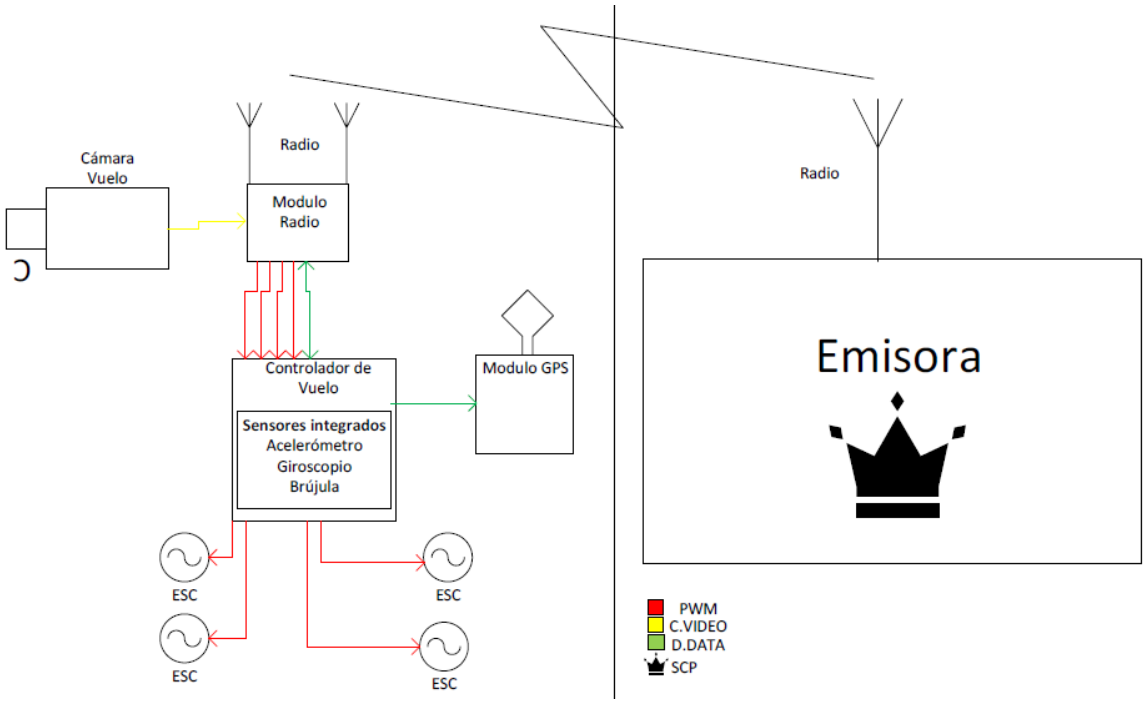
El ESC tendrá tres juegos de cables. Hay tres cables de gran diámetro (por tal de poder asumir los

requisitos de potencia suelen demandar este tipo de motores) que se conectan a los tres cables del motor trifásico. Otros dos cables de gran diámetro se conectan al circuito de distribución de energía o batería, esto suministra voltaje al ESC y los motores. También habrá tres cables más pequeños que se conectan a su controlador de vuelo. Uno de ellos es la señal de control del motor, que es una señal PWM con el que se dan órdenes al ESC. Los otros dos cables van al receptor o a un circuito de distribución de energía dado que muchos ESC incorporan un regulador de voltaje de 5V o BEC aprovechando su conexión directa o cuasi directa a la batería

El ESC debe estar clasificado para manejar la corriente máxima que consume su motor. Siempre es aconsejable elegir un ESC que tenga una clasificación más alta que la corriente máxima del motor.

4.4 EL SISTEMA DE CONTROL

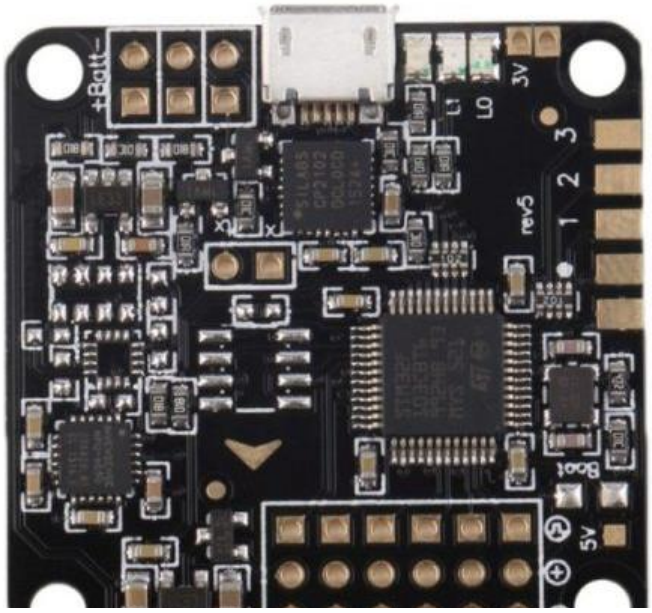
En este apartado veremos cómo se controla el cuadricóptero. El esquema de control es el siguiente:



20: Diagrama control cuadricóptero

Los conectores están clasificados por colores según el tipo de señal que envían/reciben. SCP o Sistema de Control Principal, indica que punto del sistema tiene el control primario de la aeronave. Explicado con más detalle en el apartado 3.3.2.

Ahora procederemos a explicar cada uno de los elementos de control



21: Típico controlador de vuelo

El controlador de vuelo

El controlador de vuelo es el cerebro de su cuadricóptero. Este es el dispositivo que controla la velocidad de sus motores enviando señales PWM a los ESC.

El piloto no controla directamente los motores de cuadricóptero, simplemente mediante la emisora u otro sistema de control da cambios en las inclinaciones del vehículo o altitud i el controlador traduce estas órdenes en velocidades de los motores para poder cumplirlas.

Los controladores de vuelo avanzados tienen más funciones y están integrados con sensores como giroscopios, acelerómetros, sonar, GPS y magnetómetros. Los controladores de vuelo simples contienen solo giroscopios y acelerómetros, lo cual es el mínimo para hacer que la aeronave se mantenga en el aire.

Los controladores de vuelo son en realidad pequeños ordenadores y, como tales, pueden programarse conectándolos a un PC.

Transmisores y receptores de radio

Los transmisores y receptores de radio son lo que nos permiten dar órdenes al controlador de vuelo de un cuadricóptero. Las órdenes se dan mediante el accionamiento de unos “joysticks” en la emisora. Cada uno de los ejes de los joysticks representa uno de los movimientos posibles de la aeronave. Cada uno de estos valores que pueden ser positivos o negativos se transmite por un “canal”. Cuantos más canales extras a parte de los 4 básicos (Altitud, guiñada, cabeceo y balanceo) tengamos, más opciones de control tendremos. Por ejemplo, la inclinación de una cámara, accionar la

misma cámara etc.

22: Emisora radiocontrol y sus canales básicos

Cada canal en el sistema de radio controla una sola función o dispositivo en el cuadricóptero.

Por ejemplo, el caso más común en un cuadricóptero

Canal	Función
1	Cabeceo; acelerar hacia adelante o hacia atrás
2	Balanceo; Acelerar hace la derecha o izquierda
3	Altitud; Subir o Bajar
4	Guiñada; girar hacia la derecha o izquierda

Un canal también se puede utilizar para cambiar entre diferentes modos de vuelo.

Muchas emisoras de equipos comerciales utilizan, además, otros canales de radio bidireccionales, es decir que no solo envían información, sino que también la pueden recibir, para poder comunicarse con la aeronave y obtener información de su estado,

tal como batería, posición, velocidad etc. También es común que la aeronave envíe video a la emisora.

4.5 PRUEBAS DE CAMPO CON UN CUADRICÓPTERO

Como es citado antes, por tal de tener una medida base del cuadcoptero típico realizaremos unos ensayos intentando obtener datos de su rendimiento: Tiempo de vuelo, velocidad de vuelo, máxima distancia cubierta etc. Entre paréntesis escribiré la referencia de los ensayos de los cuales he obtenido los datos.

Datos técnicos:

Dimensiones:

Peso: 398.25g Seco 559.64g en orden de marcha

Motorización: 4 Motores trifásicos con hélices de 19 cm de diámetro

Batería: 11.1v 2000 mAh LiPo

Prestaciones de vuelo

Velocidad máxima: 10 m/s (36 Km/h)

Velocidad ascensional máxima: 4 m/s (14.4 Km/h)

Distancia sobre el terreno recorrida media: 2.1 km

Tiempo de vuelo medio: 10 minutos

Consumo medio por motor: 1.5 Ah

Consumo medio aparato: 8 Ah *(Fimi 1).*

Conclusión

La aeronave toda y no llevar ninguna carga y ser de un modesto peso tiene una distancia operacional bastante limitada. La limitada distancia recorrida sobre el terreno significa que con una cámara angular 80º volando a 100 metros del terreno podríamos cubrir un área de 35000 m^2 o 0.35 km^2. Es decir. Para topografíar una cuenca de 30km^2 Necesitaríamos realizar más de 100 vuelos. Una tarea faraónica.

4.6 LAS DEBILIDADES DE UN CUADCOPTERO

Como hemos discutido en los apartados anteriores los cuadcoptero tienen una serie de debilidades que no los hacen ideales para ciertos trabajos. Sus principales debilidades son:

- Autonomía de vuelo.

Por culpa de su mecanismo de vuelo, no tienen la capacidad de planear. Eso significa que el vehículo depende de trabajo constante por parte de los motores para mantenerse en el aire. Incluso si el vehículo está perdiendo altitud no puede apagar sus motores. Este hecho gravemente afecta su eficiencia de vuelo y por tanto su autonomía, o tiempo que puede mantenerse funcionando con una determinada cantidad de energía (limitada por la capacidad de las baterías)

- Velocidad de vuelo

Todo y que existen cuadcopteros que pueden alcanzar grandes velocidades normalmente pagan un alto precio en forma de eficiencia. La forma del vehículo normalmente suele ser extremadamente anti aerodinámica limitando su velocidad máxima y su eficiencia a esas velocidades

- Precio

Todo y que existe la posibilidad de construir tu propio cuadcoptero con un kit (el hecho que reduce grandemente su precio) la mayoría de los vehículos listos para ser utilizados y especialmente si se trata de vehículos grandes con una gran capacidad de carga de tipo “Profesional” (como los que se necesitan para realizar trabajos fotogramétricos) son excepcionalmente caros. El simple hecho de que el vehículo tenga que poseer varios motores con varios controladores de velocidad para los mismos motores aumenta mucho su precio.

5 PROPUESTA ALTERNATIVA: AERONAVE DE ALA FIJA

Dado que los trabajos topográficos en el campo de la hidrología normalmente abarcan grandes extensiones y no se ven favorecidos por las ventajas que presenta una aeronave de vuelo vertical como un cuadcoptero un vehículo de otro tipo realmente seria muchísimo más favorable para este campo.

Una aeronave de ala fija se ajusta a la perfección a los tipos de trabajos que se suelen hacer en el campo de la hidrología. Largas distancias, sin necesidad de detenerse en medio vuelo etc. Todo y eso, tendremos que demostrar que realmente una aeronave de ala fija es realmente superior en esta aplicación a un cuadcoptero por lo tanto deberá tener: más autonomía, mayor velocidad, precio inferior a sistemas ya existentes.

Con esto en mente nos marcaremos los siguientes objetivos para el vehículo a desarrollar:

5.1 OBJETIVOS DEL VEHÍCULO

- Capacidad de generar orto fotogrametría

Ha de ser capaz de portar las cámaras y sistemas de manera que pueda ser utilizado para la creación de DEMs (Digital Elevation Model) para su uso en programas de cálculo hidrológico. Este es el objetivo principal de este proyecto dado que los modelos del terreno que se necesitan en los cálculos de cuencas hidrológicas suelen ser extensos. Por esta razón las ventajas de una aeronave de ala fija como, mayor velocidad, mayor eficiencia y mayor alcance lo hacen el tipo de vehículo aéreo ideal. Las decisiones que tomaremos en el momento de elegir las dimensiones y prestaciones de la aeronave giraran en torno a este objetivo.

- Precio menor a 600€

Este precio lo convertiría en un vehículo extremadamente económico en comparación con los sistemas ya existentes (DJI Phantom 4 PRO MSRP: 1700€)

Este modesto precio, además, lo haría alcanzable para pequeños ayuntamientos o departamentos hidrológicos con poco presupuesto.

- Autonomía media sobre el terreno de 8 km

Este número obviamente variara según las condiciones atmosféricas y eólicas del vuelo, pero es un buen objetivo que alcanzar dado que con la misma cámara con la que hemos calculado la superficie cubierta en el apartado 3.4 obtendríamos una superficie de 1.67 km^2 cubiertos, reduciendo el número de vuelos a 17 vuelos, una tarea más que realizable en varios meses

- Velocidad de vuelo media mínima 50 km/h (13.88 m/s)

Una de las grandes diferencias entre las aeronaves de vuelo vertical y las de ala fija es la alta eficiencia que mantiene las segundas al mantener velocidades elevadas. Esto reducirá notablemente el tiempo a realizar las misiones pudiendo aprovechar así al máximo las horas del día con más luz por tal de obtener los resultados en un margen temporal más corto

5.2 DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM)

Un Digital Elevation Model (DEM) es una representación 3D de la superficie de un terreno, comúnmente de un planeta (por ejemplo, la Tierra), la luna o un asteroide, creado a partir de los datos de elevación de un terreno. Un "DEM global" se refiere a una grilla global discreta.

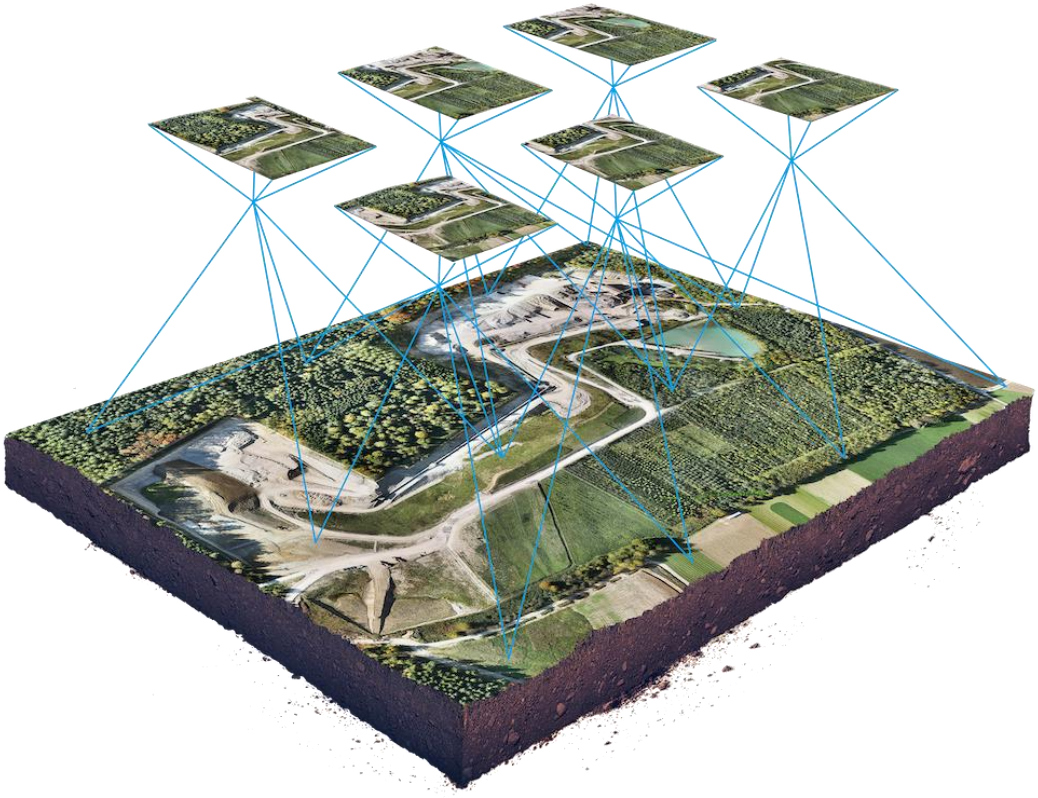
23: DEM de Sierra Nevada, España

Los DEM se usan a menudo en los sistemas de información geográfica y son la base más común para los mapas en relieve producidos digitalmente. Si bien un modelo de superficie digital (DSM, por sus siglas en inglés) puede ser útil para aplicaciones de modelado de paisajes, modelado y visualización de ciudades, a menudo se requiere un modelo de terreno digital (DTM) para modelado de inundaciones o drenaje, estudios de uso de la tierra, aplicaciones geológicas y otras aplicaciones, y en ciencia planetaria. En concreto en el campo de la hidrología superficial estos modelos resultan vitales para poder realizar todo tipo de estudios hidrológicos; Cálculos de avenidas, estudios de inundabilidad y estudio de movimientos de agua en el terreno. Dado que el terreno es cambiante, sobre todo en el estudio de los cauces de ríos, es necesario mantener actualizado los modelos de elevación del terreno donde se realiza el estudio.

5.2.1 Creación de DEMs mediante fotogrametría

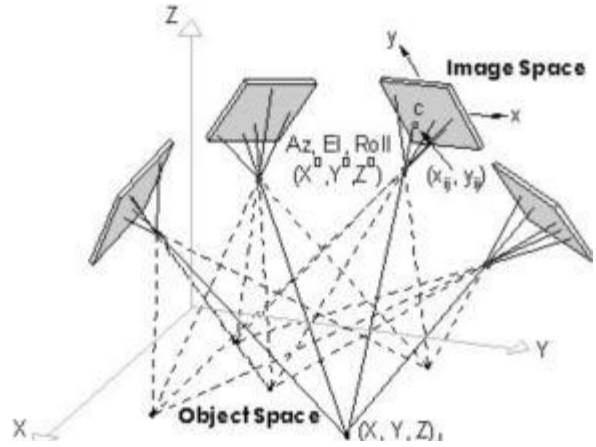
La fotogrametría es la ciencia y la tecnología para obtener información confiable sobre objetos físicos y el medio ambiente a través del proceso de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas y patrones de imágenes radiantes

electromagnéticas y otros fenómenos.

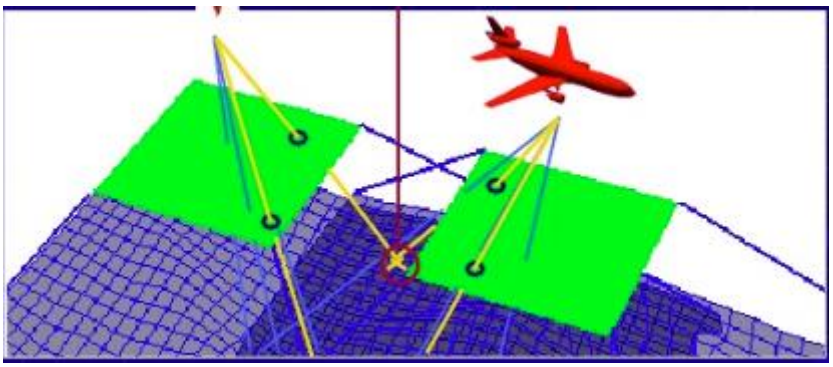


24: Obtención de un DEM + Textura mediante fotogrametría

Hay muchas variantes de fotogrametría. Un ejemplo es la extracción de mediciones tridimensionales a partir de datos bidimensionales (es decir, imágenes); por ejemplo, la distancia entre dos puntos que se encuentran en un plano paralelo al plano de la imagen fotográfica se puede determinar midiendo su distancia en la imagen, si se conoce la escala de la imagen. Otra es la extracción de rangos de color precisos y valores que representan cantidades tales como albedo, reflejo especular, metalicidad u oclusión ambiental de fotografías de materiales con el propósito de renderizar físicamente.



25: Ejemplo triangulación fotogramétrica



26: Triangulación Fotogramétrica mediante aeronave

En nuestro caso con la intención de generar el DEM realizaremos vuelos tomando fotografías sucesivas. Después mediante software podemos obtener el modelo al triangular puntos en el terreno y observar su desplazamiento relativo entre ellos. Gracias al efecto paralax y que conocemos las coordenadas absolutas GPS donde se tomaron dichas fotografías podemos triangular la posición de los mismos puntos, lo cual nos permite obtener sus coordenadas y por tanto generar la superficie del terreno

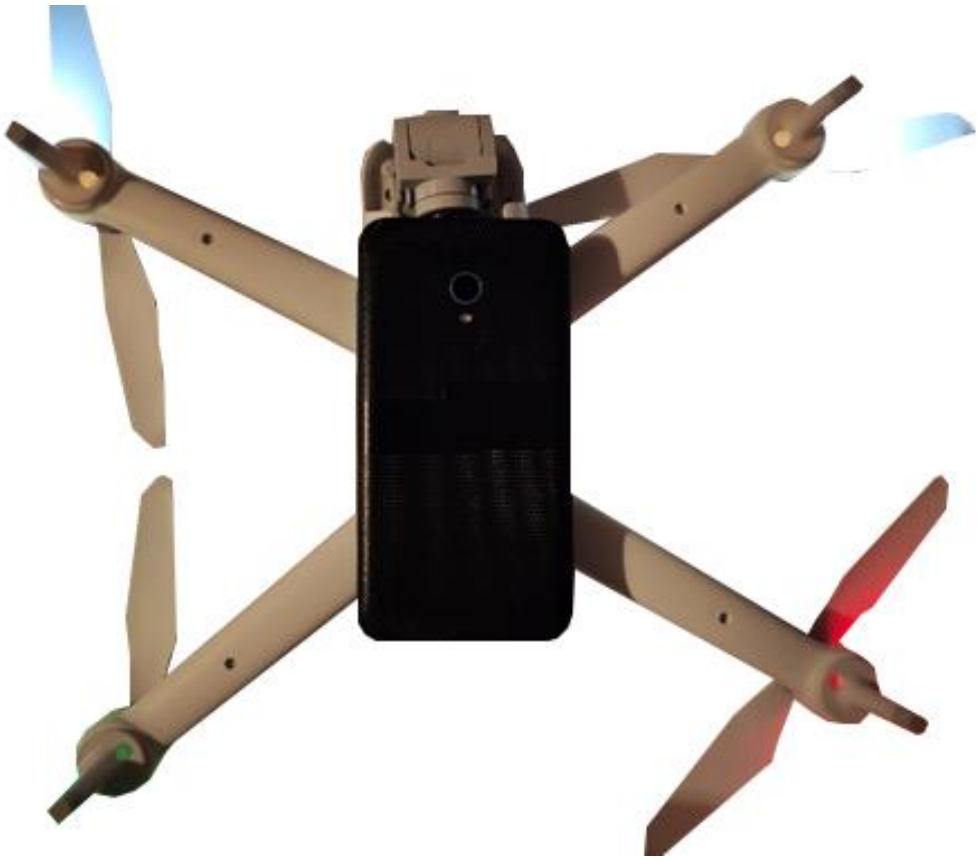
5.2.2 Software para la generación del DEM

Una vez tenemos las fotos del terreno necesitamos un software que realice dichos cálculos. Agisoft Metashape se ha convertido en un estándar de software usado por muchas empresas en el campo del GIS y UAVs por su robustez, sencillez y efectividad.

Todo y eso tenemos que realizar varias pruebas para ver que se ajuste a nuestra aplicación. Dado que si la cámara reside fija en el fuselaje del avión (sin ningún tipo de estabilización que la haga mantener una orientación absoluta) reduciríamos en gran medida el peso, complejidad y coste de la aeronave; la cámara ira cambiando ligeramente su orientación dado que un avión requiere de cambios en su orientación por tal de poder navegar por el aire, lo cual puede generar conflictos dado que las fotografías no estarán siempre perfectamente alineadas con el terreno. En teoría el programa Metashape está preparado para corregir estas condiciones, pero tendremos que comprobarlo. Este método que utilizaremos (cámara fija en el fuselaje) lo llamaremos FFCP (Fuselaje Fixed Camera Photogrammetry)

5.2.3 Prueba Agisoft Metashape en método FFCP

Antes de incorporar este método de captura de imágenes en esta aeronave tenemos que comprobar que realmente sea un método valido y funcional para realizar fotogrametría. Para ello realizaremos un vuelo en un terreno con cotas conocidas en el municipio de Cabrils con un móvil acoplado al cuadcoptero con una plataforma antivibración tal como podemos observar en la siguiente foto:



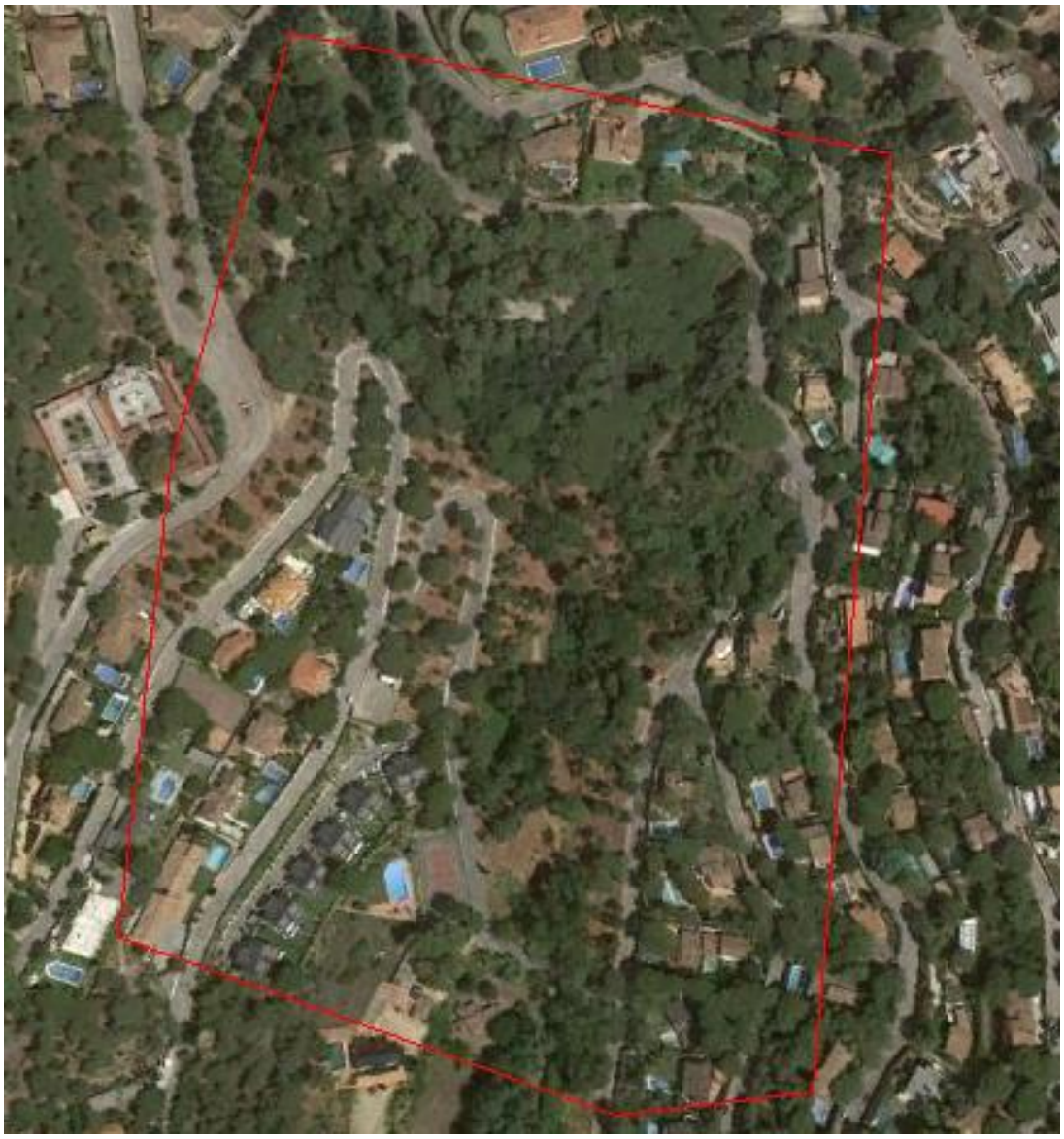
27: Cuadcoptero con el móvil acoplado

Utilizaremos un móvil porque es una forma asequible de obtener una serie de fotografías con metadatos GPS para poder ser procesadas en el programa que utilizaremos. La calidad de las fotos tomadas con un teléfono móvil es muy limitada, por lo tanto, si el sistema funciona marginalmente bien con el móvil, con una cámara mejor, no tendrá ningún problema para funcionar.

Para considerar la prueba un éxito se han de cumplir las siguientes condiciones:

- Obtención de imágenes utilizables (no borrosas ni desenfocadas)
- El programa sea capaz de leer las imágenes y geo posicionarlas con los metadatos GPS
- El programa sea capaz de entender que no todas las fotos apuntan directamente al suelo y las alinee debidamente
- Generación de un DEM coherente
- Tolerancias entre el DEM y el terreno real en el orden de metros

Durante la prueba el móvil realizara fotos cada 2 segundos con geolocalización GPS. Después introduciremos las fotos obtenidas durante el vuelo en el programa “Agisoft Metashape Profesional” donde comprobaremos si se cumplen los requisitos establecidos.



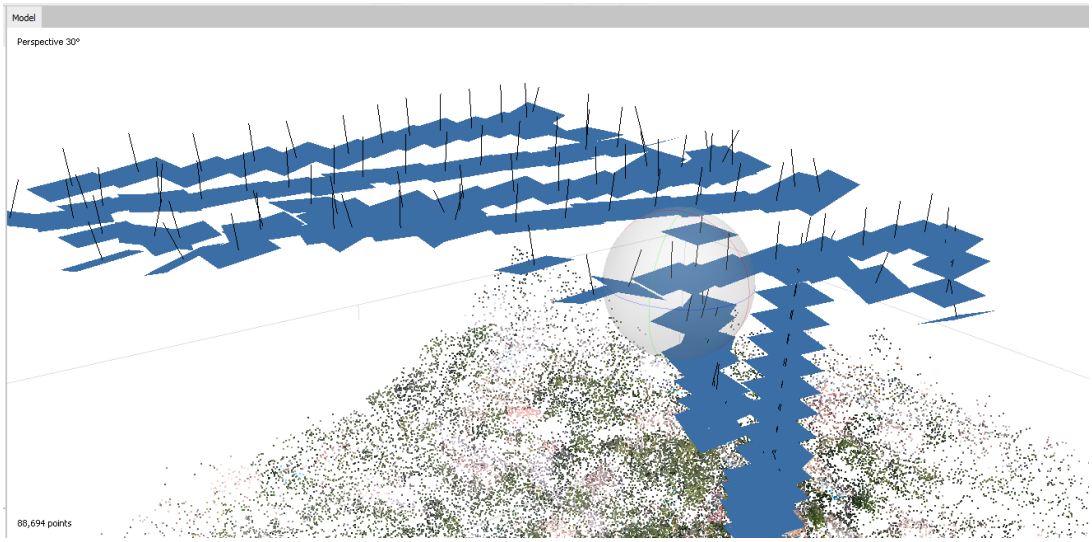
28: Zona de la cual obtendremos el DEM

RESULTADOS

El vuelo se realizó sin incidencias. Se realizaron 6 pasadas en el terreno a una altitud de 385m sobre el nivel del mar y una distancia variable sobre el terreno entre 100m a 185m, el vehículo en algunos puntos fue forzado a adoptar orientaciones fuertes (≈30º). Se realizaron a las 13:30 por tal de minimizar las sobras presentes en las fotos.

Se tomaron 119 fotos, algunas de ellas descartadas al estar borrosas.

Introducimos las fotos en el programa, el cual detecto los metadatos GPS de estas. Después realizamos el cálculo de la orientación de las cámaras como podemos ver en la siguiente imagen



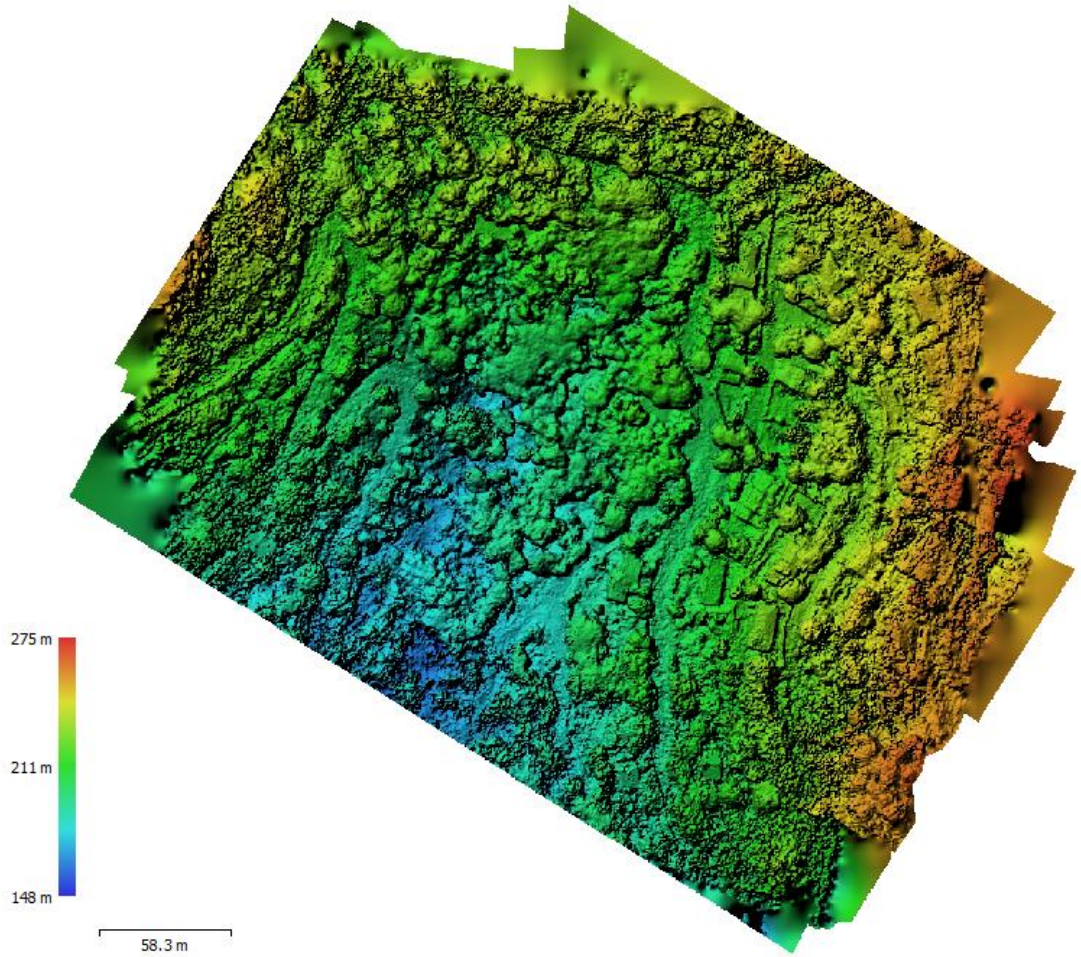
29: fotografías alineadas y corregidas en su orientación

Tal como podemos observar la inclinación de todas las fotos tiene sentido con los movimientos que realizaba el dron en cada punto;(cambios de dirección al final del recorrido de la recta etc. etc.)

Generamos la nube de puntos de profundidad y seguidamente el modelo 3D

30: DEM texturizado

Por último, se genera el DEM



31:DEM generado con móvil en modo FFCP

Después del procesado podemos afirmar que el método FFCP combinado con el software Agisoft Metashape obtiene resultados satisfactorios. Las diferencias de cotas entre los puntos ensayados están dentro de un margen razonable.

5.3 EQUIPO FOTOGRAMÉTRICO DE LA AERONAVE

5.3.1 Selección de la Cámara

A partir de las experiencias obtenidas en el apartado anterior y siguiendo los criterios establecidos hemos de encontrar la cámara que más se ajuste a nuestro objetivo.

Unos buenos mínimos serían los siguientes:

- Mínimo 1080p (A mayor resolución mayor precisión en la resolución del DEM)
- Angular de la lente grande (Permite no perder información en el modo FFCP dado que permite al software corregir la inclinación del aparato
- Posicionamiento GPS (Para tener georreferenciadas las fotos y por tanto también el DEM)

Cámaras fotogramétricas profesionales como la SenseFly S.O.D.A. Están fuera de cuestión por su elevado precio. Con la intención de encontrar un instrumento de prestaciones parecidas a una fracción del precio lo buscaremos en el mercado de consumidor.

Después de un estudio de las cámaras con los requisitos establecidos obtenemos la siguiente tabla:

Cámara	SenseFly S.O.D.A.	GOPRO Hero8	Azdome GS63H	Nikon W300
Resolución	5,472 x 3,648	4290 x 2800	2880 x 2160	4608 x 3456
Tamaño Sensor	1''	1/2,3"	1/3 "	3"
Lente	F/2.8-11, 10.6 mm	F/2.8 N/A	N/A	4.3-21.5mm f/2.8-4.9
FOV	Estrecho	180º	150˚	Estrecho
GPS	GPS + RTK/PPK	GPS	GPS (no foto)	f/2.8-4.9
Precio	1,800 €	380 €	70 €	260 €

Sensefly S.O.D.A. representa la parte del mercado profesional. Es una cámara diseñada estrictamente para ser usada en tareas fotogramétricas. Dispone de unas impresionantes prestaciones técnicas, sobre todo en el campo de resolución y sistema GPS, que es la única que ofrece GPS RTK. Su precio la hace absolutamente fuera de cuestión para este vehículo.

GoPro Hero 8 queda fuera de opción dado que su precio es demasiado alto para las prestaciones que presenta.

Azdome GS63H Es una “Dashcam” o cámara para grabación en el coche con unas impresionantes prestaciones técnicas para su precio. Una resolución respetable combinado con logging GPS y un extremadamente bajo precio la hacen la opción que elegiremos para este vehículo.

La cámara Nikon Coolpix W300 es una posible opción de mejora en un futuro. Tiene prestaciones mucho mejores que la GoPro hero8 a un precio mucho más asequible

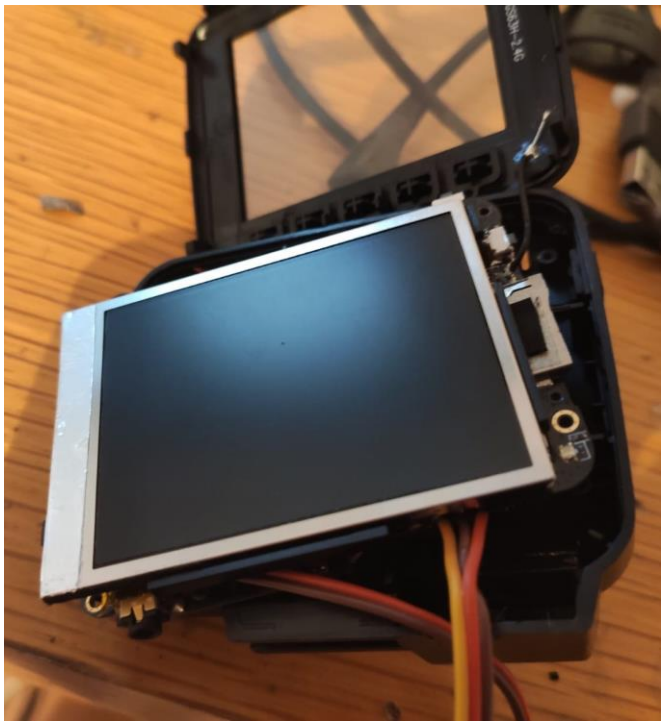
Cámara escogida: Azdome GS63H

5.3.2 Modificaciones Azdome GS63H

Antes de poder utilizar la cámara en el vehículo tendremos que realizar ciertas modificaciones en la misma. La cámara para funcionar necesita una fuente de energía. En condiciones normales de operación la cámara obtendría la energía del coche mediante un adaptador de 12 v a USB. Este tipo de instalación no es viable de ser instalada en el avión por restricciones de peso y tamaño dado que sería introducir material completamente innecesario el cual reduciría la eficiencia de vuelo del avión.

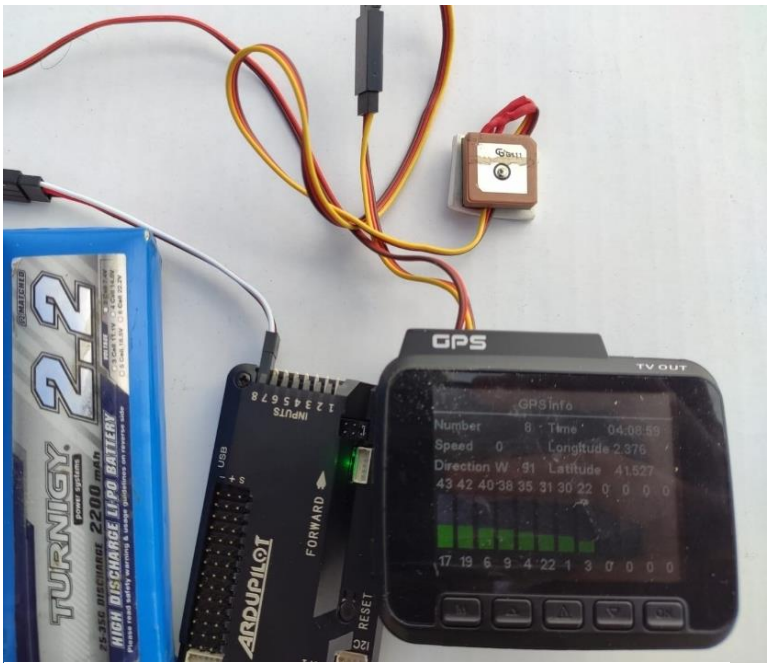
La cámara necesita 5v de corriente continua para funcionar. El avión deberá tener un circuito de ese mismo voltaje (Ver en siguientes apartados) para hacer funcionar los servomotores los cuales controlan las superficies de control y por tanto el avión. Todo

y eso para hacer posible que la cámara se conecte al circuito de 5v del avión se tendrá que realizar una modificación donde tendremos que realizar un desvío del conector interno USB de la cámara a un conector externo.



32: Cámara siendo ensamblada post modificaciones

La antena GPS de la cámara también se tendría que relocalizar dado que se encuentra en el interior de la cámara y en su posición de uso, con la cámara mirando hacia abajo, esto junto a su posición, probablemente dentro del avión, hará que su recepción y precisión GPS sea más bien pobre. Para eso desoldaremos el módulo GPS de dentro del circuito eléctrico de la cámara y mediante unos conectores realizaremos una conexión entre la placa interna de la cámara y la antena GPS. Por suerte la antena GPS utiliza solo tres cables; Tierra, +5V y data. Eso nos permite utilizar un cable con conector JST de servomotor. Eso nos permite extender la antena GPS al punto del avión que necesitamos.

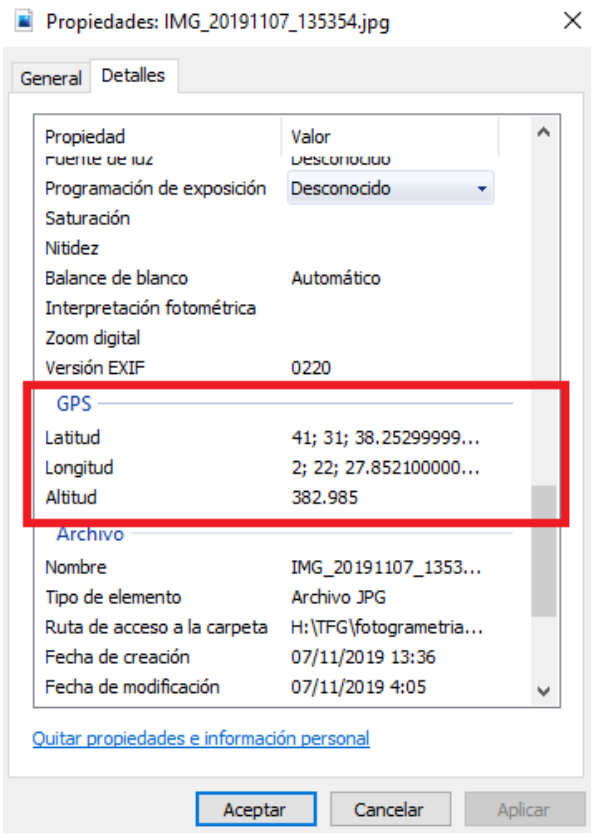


33: Cámara en prueba con antena GPS y alimentación externa

Después de realizar las modificaciones, realizamos unas pruebas para comprobar que las modificaciones han sido exitosas. La cámara fue conectada a una fuente de alimentación 5v como a la que estará conectada en la aeronave. También se probó que la recepción GPS de la antena no se viese afectada al estar conectada externamente; Ambas pruebas fueron exitosas no existiendo ningún problema en la operación de la cámara.

5.3.3 El problema de los metadatos

Tal como comentamos en el apartado 4.3.1 es importante que la cámara grabe metadatos GPS mientras recoge las imágenes. La cámara Azdome GS63H presenta un problema; a pesar de tener la opción de grabar videos con información GPS en tiempo real, no es capaz de realizar la misma función mientras toma fotos. Inexplicablemente la función de añadir metadatos GPS en las fotografías se encuentra ausente. Todos mis intentos de extraer fotografías del video y mantener los metadatos GPS no tuvieron éxito. Por tal de solventar este inconveniente me puse en contacto con el fabricante de la cámara, una empresa china basada en Shenzhen llamada "Azdome" y con el productor del software "Metashape", Una empresa basada en San Petersburgo llamada "Agisoft".



34: Ejemplo de fotografía con metadatos GPS

Después de un intercambio de correos con la empresa Azdome me informaron que trabajarían en la actualización del software interno de la cámara con la intención de que pueda grabar metadatos GPS en las imágenes al igual que es capaz de hacer con los videos. El inicio de nuestras comunicaciones fue el 19/11/2019 y hasta la fecha actual no han publicado ningún Firmware con las características sugeridas y sus contestaciones a mis e-mails preguntando sobre el estado del firmware son genéricas y repiten que están trabajando en ello.

El Intercambio de correos con Agisoft resultó mucho más fructífero. Después de cooperar con ellos enviando programas y códecs que utilizo para poder leer los metadatos GPS presentes en el video me afirmaron el día 23/12/2019 que tenían todo lo que necesitaban para implementar la importación de video con GPS en formato "Novatek" (Fabricante del procesador de imagen de la cámara GS63H) para su uso en el programa Metashape. Después de unos meses la siguiente información se publicó en su página de desarrollo de Metashape

Agisoft Metashape Change Log

Version 1.6.3 build 10732 (14 June 2020)

Standard and Professional editions

- Added Embed texture option for model export in FBX format.
- Updated OSGB model export to generate OpenSceneGraph 3.0 compatible files.
- Improved mesh decimation performance and memory consumption.
- Fixed crashes on Intel HD when generating depth maps.
- Fixed export of large AVI files (>4GB).
- Bug fixes.

Professional edition

- Added GeoPackage format support for shapes import/export and DEM/orthomosaic export.
- Added Clip to boundary shapes option to export dialogs.
- Added Generate background masks option to Detect Fiducials dialog and added circle fiducial marks support.
- Added Show In Front/Show Behind options for image overlays in Model view.
- Added support for GPS meta data import from Novatek MP4 videos.
- Added Automatically open properties dialog option to Shape Properties dialog.
- Added confidence and normals support to LAS/LAZ formats using extra bytes field.
- Added coordinate system selection option for PATB export.
- Added untransformed DEM height values support to 4DMapper uploader.
- Added Stealth Z-Mouse controller support.
- Added stereo cursor appearance settings to Preferences dialog.
- Updated tiled model export in OSGB format to include georeferencing information.

Como se puede leer, el 14 de junio añadieron el soporte para la importación de videos con metadatos GPS en formato Novatek, permitiendo la importación del video y subsecuente separación en imágenes, existiendo la posibilidad de escoger la cantidad de fotografías a obtener del video.

Este hecho puede parecer trivial pero no lo es en absoluto. La gran mayoría de “dashcams” y cámaras de origen en china utilizan algún tipo de procesador de imagen Novatek, por no decir absolutamente todas. Esto resulta ser gran paso adelante para la fotogrametría de bajo coste, tanto amateur como profesional, abriendo un gran abanico de opciones para el uso de cámaras con precios muy asequibles y prestaciones más que utilizables para proyectos cartográficos científicos.

También hay que destacar que utilizar un video y del extraer fotos representa una ventaja respeto al uso de fotografías tomadas en campo. Si con la aeronave se han

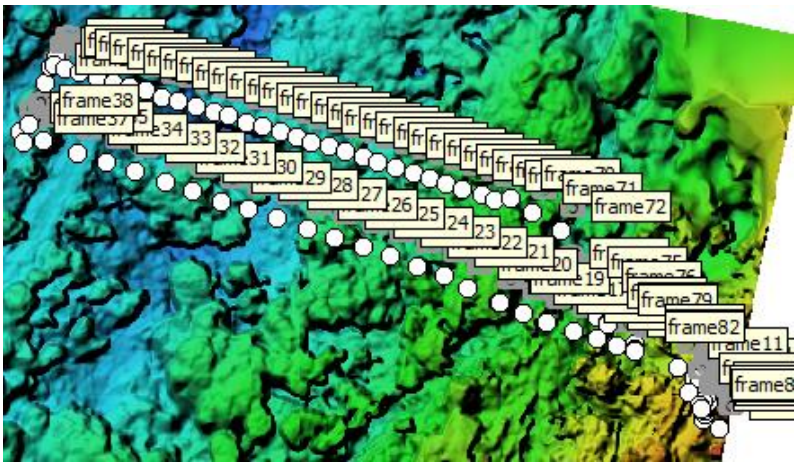
obtenido imágenes directamente, el número de imágenes para realizar el estudio está limitado por la cantidad de imágenes tomadas. Si más adelante en el proyecto se considera que se necesitan más imágenes se tendrá que realizar otro vuelo. Al grabar un video el usuario tiene la opción de decidir el número de fotografías a extraer del mismo, pudiendo incluso, aumentar el número de fotografías en zonas que requieren un estudio más preciso y reducir el número de las zonas de bajo interés.

5.3.4 Prueba Cámara Azdome GS63H

Al igual que realizamos en el apartado 4.2.3 realizaremos una prueba con el mismo procedimiento y objetivos. La diferencia es que esta vez en lugar de utilizar un teléfono móvil como cámara utilizaremos la cámara GS63H en la misma configuración que utilizaremos en la aeronave. El cable con la conexión de alimentación se conectará a un BEC el cual estará conectado a la toma de 12v del cuadcoptero; de esta manera estará conectado en condiciones idénticas a las que estará conectado en la aeronave. La antena GPS estará ubicada en la parte superior del cuadcoptero. La cámara, BEC, antena y cables serán sujetos al cuadcoptero.

El vuelo se realizó sin incidencias. Se realizaron 2 pasadas en el terreno a una altitud de 350m sobre el nivel del mar y una distancia sobre el terreno variando de desde 80m a 130m.

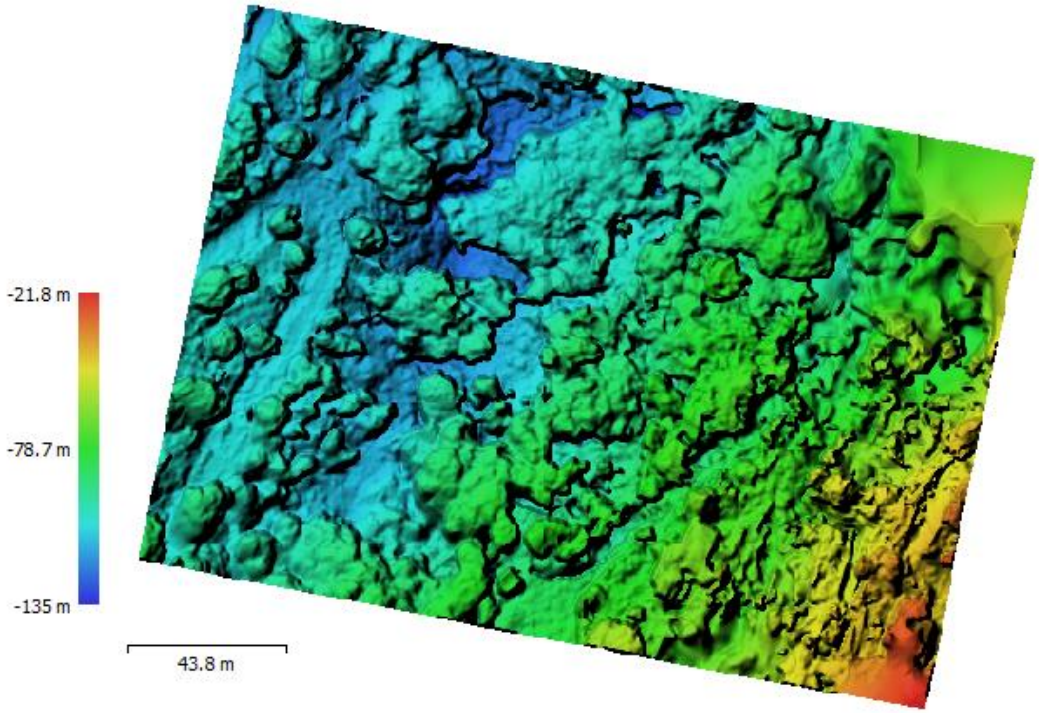
La cámara grabó video con resolución de 2880 x 2160 pixeles a 30 fotogramas por segundo. Las imágenes presentan una ligera sobreexposición. Los metadatos GPS fueron grabados correctamente.



35: Resultado de la conversión de video a fotos con GPS

El video se importó a Metashape a una ratio de 1 foto por segundo. Las fotos fueron importadas correctamente y sus metadatos GPS fueron correctamente interpretados.

El DEM generado fue el siguiente:



36:DEM obtenido con Cámara Azdome

Como podemos observar, las alturas absolutas no son correctas; La cámara no incluye en sus metadatos GPS el campo de altitud por lo tanto la altitud a la que vuela la tiene que estimar el programa a partir de su posición y el resto de las fotos. Por lo tanto, las alturas relativas dentro del DEM son correctas, pero no absolutas. Esto no supone un problema dado que sabiendo la altitud absoluta de uno o varios puntos en el mapa mediante tratamiento GIS podemos obtener el modelo corregido.

En la siguiente tabla hemos comparado varios puntos en el mapa y comparado entre ellos. La zona en verde representa las alturas relativas entre los puntos. Las alturas no son absolutas dado que no se les ha aplicado una correción de altitud global al no tener ningun punto georeferenciado fiablemente.

	p1	p2	p3	Incr 12	incr 13	Incr 23
Google Earth	151	140	137	11	14	3
DEM1	210	203	198	7	12	5
DEM2	-109	-119	-123	10	14	4

37:Tabla comparativa entre los diversos DEMs. Diferencias de altura entre los puntos en metros

Por lo tanto, vamos a revisar los objetivos que hemos establecido en el apartado 4.2.3

- Obtención de imágenes utilizables (no borrosas ni desenfocadas)
- ✓ Las imágenes son de una calidad más que aceptable
- El programa sea capaz de leer las imágenes y geo posicionarlas con los metadatos GPS

- ✓ Después de la actualización Agisoft es capaz de convertir los metadatos del video a metadatos en las fotos
- El programa sea capaz de estimar la altitud relativa de las imágenes
- ✓ La estimación de las altitudes obtenidas es satisfactoria
- Generación de un DEM coherente
- ✓ El DEM obtenido dispone de una gran resolución y precisión en comparación con el primer DEM obtenido
- Tolerancias entre el DEM y el terreno real en el orden de metros
- ✓ Las tolerancias en los puntos ensayados están en el orden de 1 metro en el peor de los puntos ensayados

Por lo tanto, podemos afirmar que la combinación de Agisoft Metashape, Azdome GS63H y método FFCP son aptas para realizar el DEM con el que demostraremos las capacidades de la aeronave.

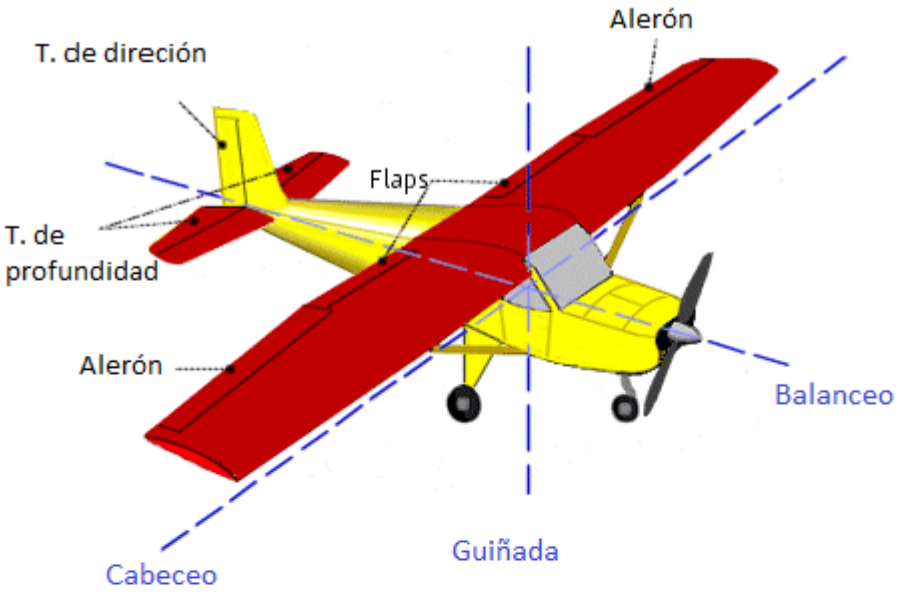
5.4 EL SISTEMA DE CONTROL DE VUELO.

5.4.1 Mecánica de vuelo de una aeronave de ala fija

Como hemos visto en el apartado 3.2, para que una aeronave realice un vuelo controlado necesita un método para controlar sus 3 ejes de rotación. En un cuadcoptero el empuje diferencial de los motores se encarga de esto. Una aeronave de utiliza superficies de control para controlar sus inclinaciones.

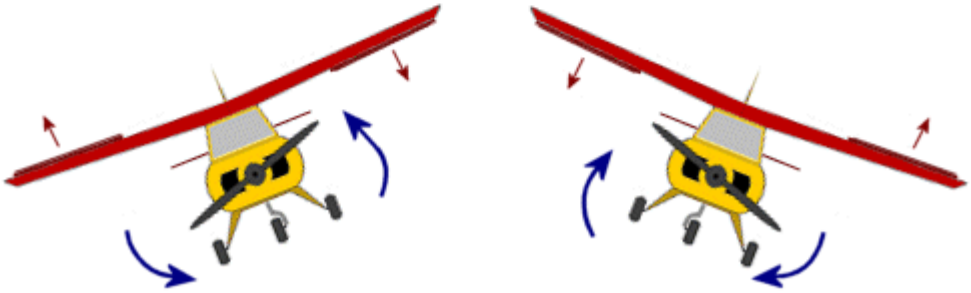
Las superficies de control son dispositivos aerodinámicos que mediante cambios controlados y provocados cambian su Angulo de ataque relativo al viento produciendo una fuerza o incremento de sustentación en partes concretas de la aeronave.

La disposición y funcionamiento de las superficies de control en una aeronave de disposición convencional es la siguiente:

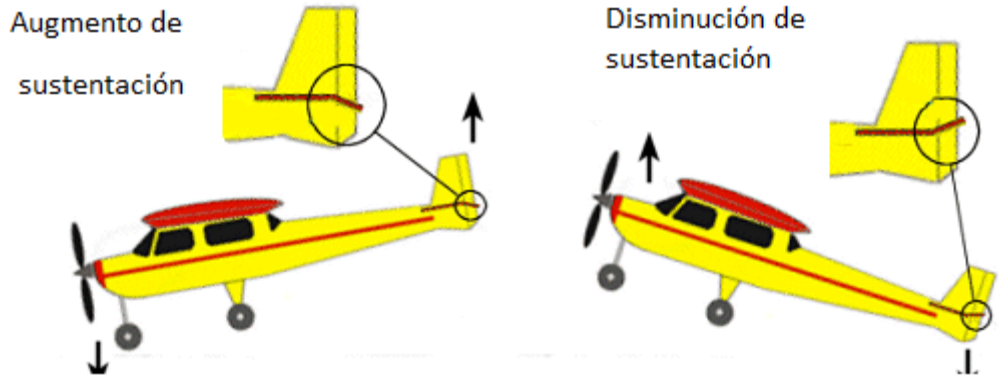


Alerones

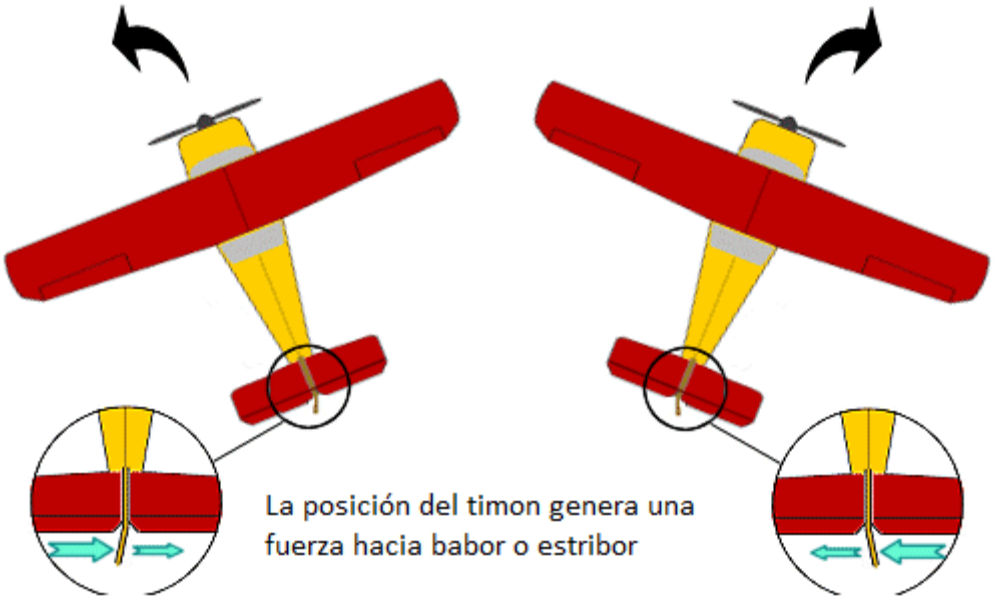
Los alerones augmentan la sustentación de una ala mientras reducen la de la otra, provocando una rotación en el vehiculo



Timón de profundidad



Timón de direción

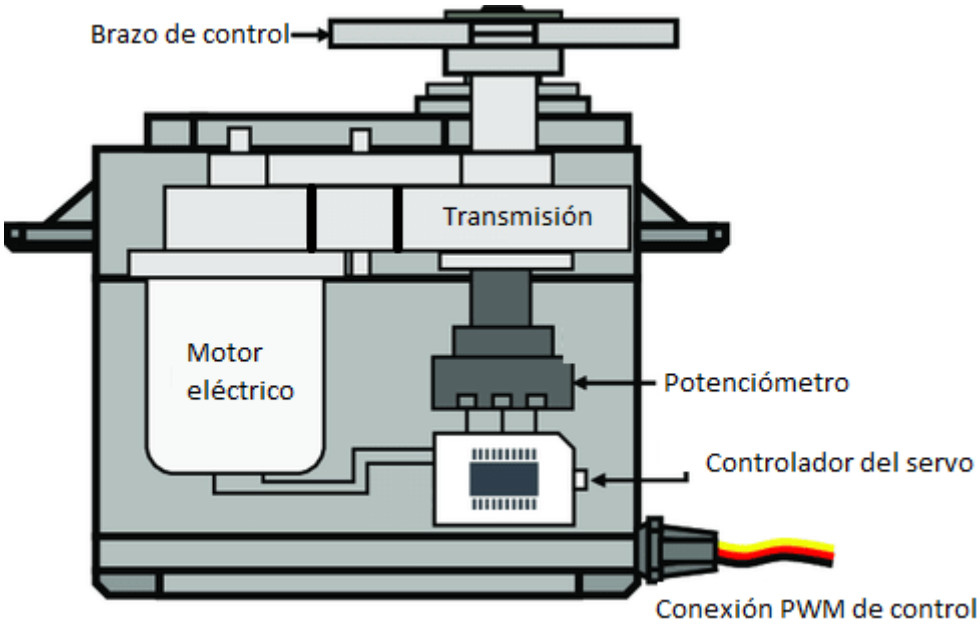


Este vehículo tendrá este sistema de control. Las superficies de control serán controladas por servomotores eléctricos. Hablaremos de ellos en el siguiente apartado.

5.4.2 Servomotores

Un servomotor (también llamado servo) es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

Los servomotores que utilizamos hacen uso de la modulación por ancho de pulsos (PWM) para controlar la posición de los motores de corriente continua.



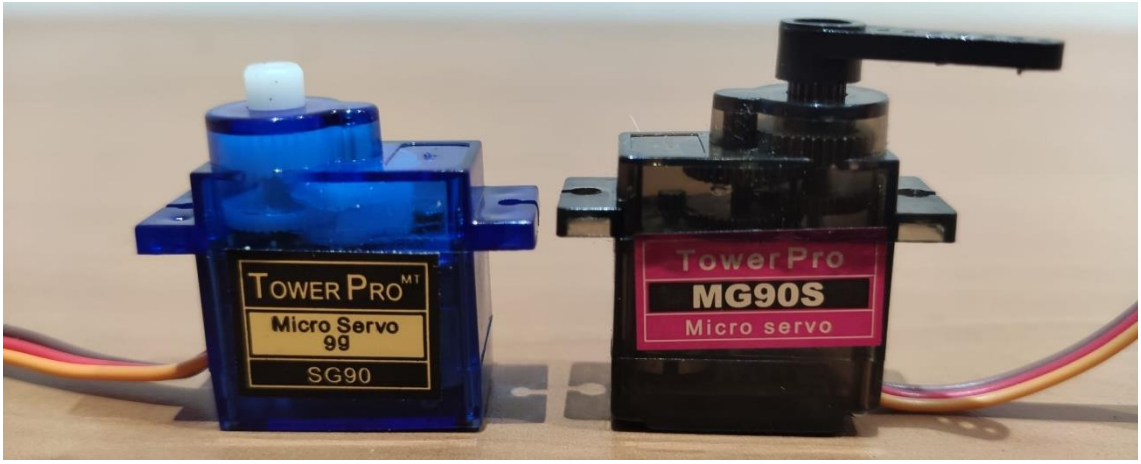
38: Componentes internos de un servomotor para modelos RC

El brazo de control está conectado a la superficie de control y al variar su posición siguiendo las órdenes del sistema de control de vuelo modifica la posición de la superficie de control.

Ahora tendremos que escoger un modelo de servomotor para nuestro avión. Utilizaremos los servomotores de tamaño estándar utilizados en modelos radiocontrol.

Tenemos dos candidatos:

1. SG90
2. MG90S



39:Servomotores a considerar.

40:Montaje servomotores con pesos colgando

Antes de utilizarlos, con la intención de comprobar su durabilidad, establecer vida útil y evitar fallos prematuros; vamos a realizar una prueba de durabilidad. Para ello montaremos los servomotores a una superficie mediante un sargento y haremos ascender y descender un peso a su máxima velocidad aleatoriamente. El peso que levantaran será de 75g.

RESULTADOS

Después de 168 horas ambos servos habían perdido fuerza hasta el punto de no ser capaz de levantar el peso. Parece ser que el punto de fallo de los dos servomotores es el motor y no los engranajes. La durabilidad de los dos

41: Pantalla con resultados después de la prueba

servomotores parece ser idéntica. El consumo eléctrico es negligible (50 mAh)

Los datos de par fueron obtenidos de las respectivas tablas de prestaciones técnicas del fabricante.

Servomotor	Par (Kg/cm)	Peso (g)	Vida útil (h)	Engranajes	Precio (€)
SG90	0,9	11,4	168	plástico ABS	1,04
MG90S	2,2	13,7	168	Aluminio	1,4

Siendo la vida útil la misma y teniendo el MG90S un par mucho mayor que el SG90 por un precio similar; será el MG90S el que utilizaremos para el vehículo.

Anotar también que todo y que la vida útil del servomotor son 168 h todos los servomotores del vehículo se tendrán que cambiar a las 100 h de vuelo. El servomotor del timón de profundidad, por su importancia para el vuelo correcto del aparato será reemplazado a las 50 h de vuelo.

Ahora que ya tenemos escogidos los servomotores necesitamos un controlador de vuelo para controlarlos.

5.4.3 Ardupilot

Dado que es un vehículo autónomo no podemos pretender controlar los servomotores directamente con la emisora. Para ello utilizaremos un controlador de vuelo con capacidad para realizar vuelos autónomos y programables.

42: Controlador de vuelo Ardupilot

Ardupilot es una suite de software de piloto automático para vehículos no tripulados de código abierto, capaz de controlar multitud de vehículos autónomos.

Ardupilot fue desarrollado originalmente por aficionados del aeromodelismo con el fin de poder controlar aviones y Rovers en pequeña escala. se ha convertido en una plataforma de piloto automático completo y confiable utilizado por la industria, organizaciones de investigación y aficionados.

El paquete de software ArduPilot consta de software de navegación que se ejecuta en el vehículo, junto con el software de control de estación terrestre incluyendo Mission Planner, APM Planner, QGroundControl, MavProxy, Tower y otros.

El código fuente de ArduPilot se almacena y administra en GitHub, con casi 400 colaboradores totales.

El paquete de software se actualiza constantemente, con integración continua y pruebas unitarias proporcionadas por Travis CI, y un entorno de compilación,

compilación que incluye el compilador multiplataforma GNU y Waf. Los binarios precompilados que se ejecutan en varias plataformas de hardware están disponibles para su descarga por parte de los usuarios de los subsitios web de ArduPilot.

El software Ardupilot se ejecuta en una amplia variedad de hardware integrado (incluidas las computadoras Linux completas), que generalmente consta de uno o más microcontroladores o microprocesadores conectados a sensores periféricos utilizados para la navegación. Estos sensores incluyen giroscopios MEMS y acelerómetros. Los sensores generalmente incluyen, además, una o más brújulas, altímetro (barométrico) y GPS, junto con sensores adicionales opcionales como sensores de flujo óptico, indicadores de velocidad del aire, altímetros láser o sonares o telémetros, cámaras monoculares, estereoscópicas o RGB-D.

En nuestro caso, el software de Ardupilot se ejecutará en una placa Mega APM2.8

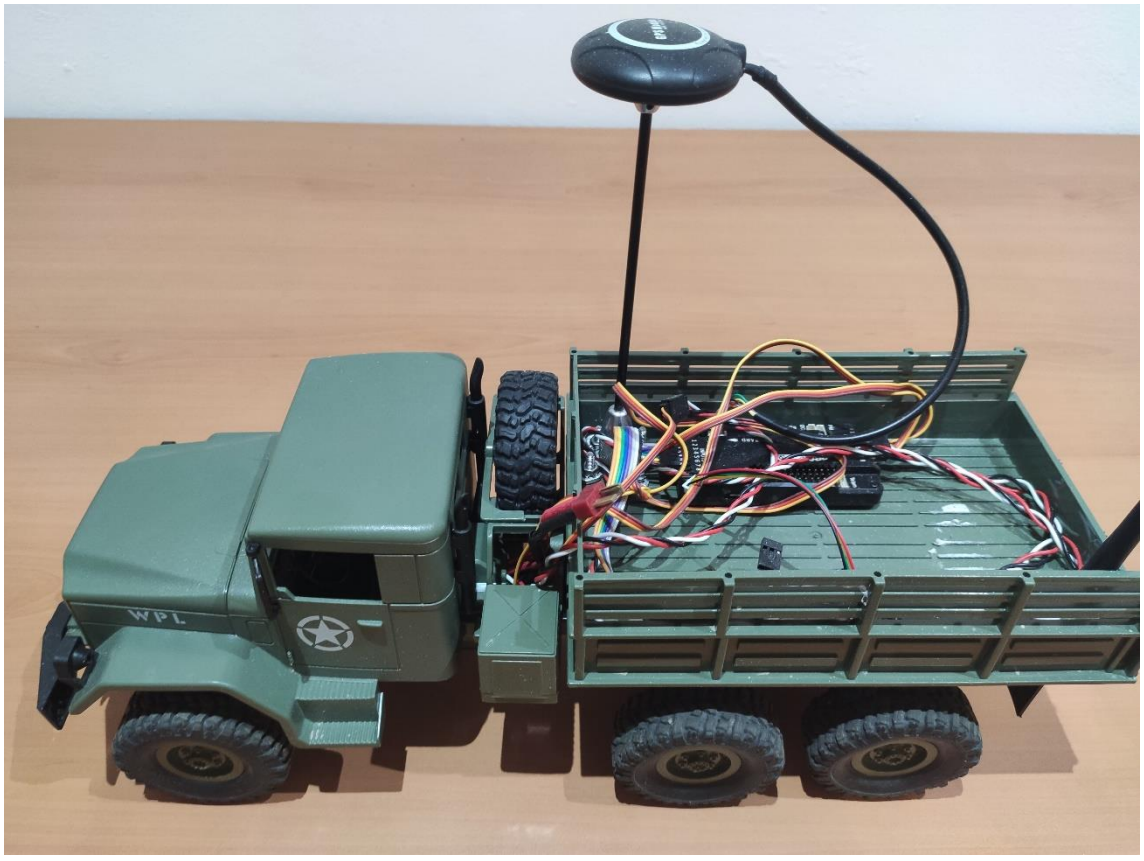
Ardupilot proporciona un amplio conjunto de características, que incluyen las siguientes características comunes para todos los vehículos:

- Modos de vuelo totalmente autónomos, semiautónomos y totalmente manuales, misiones programables con puntos de referencia 3D, geofencing opcional.
- Opciones de estabilización de vuelo en modo manual.
- Simulación con una variedad de simuladores, incluido ArduPilot SITL.
- Soporte para una gran cantidad de sensores de navegación, incluidos varios modelos de GPS RTK, GPS L1 tradicionales, barómetros, magnetómetros, telémetros láser y sonares, flujo óptico, transpondedor ADS-B, infrarrojos, velocidad del aire, sensores y dispositivos de captura de movimiento / visión por computadora.
- Comunicación del sensor a través de SPI, I^2C, CAN Bus, comunicación en serie, SMBus.
- Varias redundancias en el caso de pérdida de contacto de radio, GPS e incumplimiento de un espacio de vuelo predefinido,
- Soporte para navegación en entornos denegados por GPS, con posicionamiento basado en visión, flujo óptico, SLAM, posicionamiento de banda ultra ancha.
- Soporte para actuadores como paracaídas y pinzas magnéticas.
- Soporte e integración de estabilizador fotográfico y de video.
- Apoyo y discusión a través del foro de discurso ArduPilot, canales de chat Gitter, Github, Facebook.
- Gran variedad de modos de vuelo: estabilizar, Alt Hold, Loiter, RTL (Volver al lanzamiento), Auto, Acro, AutoTune, Brake, Circle, Drift, Guided, (y Guided_NoGPS), Land…
- Opciones de despegue: lanzamiento manual, catapulta, transición vertical (para aviones VTOL).

- Opciones de aterrizaje: pendiente de planeo ajustable, helicoidal, empuje inverso, neto, transición vertical (para planos VTOL).
- Autoajuste, simulación con simuladores JSBSIM, X-Plane y RealFlight.

Con la intención de familiarizarnos con la suite Ardupilot y por tal de probar su fiabilidad en diversas situaciones, antes de construir directamente la aeronave y colocar como sistema de control la placa Ardupilot, donde un fallo en el uso del software o de la placa podría suponer la pérdida de la aeronave, y aprovechando la capacidad de Ardupilot de no solo controlar aeronaves; construiremos un pequeño Rover o vehículo terrestre, controlado por Ardupilot. Esta plataforma nos servirá para probar la suite Ardupilot por completo.

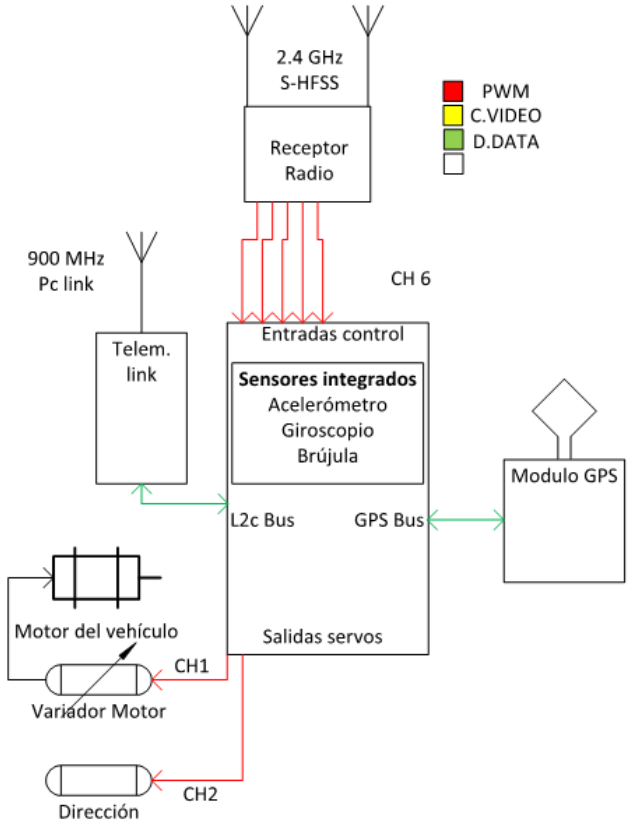
El Rover



43: Rover construido para las pruebas de Ardupilot

El vehículo controlado con la Suite Ardupilot es un modelo a escala de un camión M35 del ejército americano, diseñado para ser utilizado mediante radiocontrol. Al ser un camión nos permite colocar todas las electrónicas en su bahía de carga y junto a su tracción 6x6 lo hacen una plataforma idónea para las pruebas que vamos a realizar.

El sistema de control sigue el siguiente esquema:



44:Esquema de control del Rover

Como podemos observar, la placa Ardupilot es el componente que nos permite integrar todos los sistemas del aparato. La aeronave tendrá un esquema de control similar, pero con varios componentes añadidos.

Los componentes son los siguientes:

Receptor de radio:
Permite que nuestra emisora Radiocontrol se conecte a la placa Ardupilot. Nos permite controlar directamente el aparato si no está en ningún modo de control automático y ordenar mediante uno de los canales de la emisora que el vehículo se configure en un modo manual a modo de "Failsafe"

Enlace de Telemetría

Es un sistema de comunicación inalámbrico que habilita la comunicación directa entre la placa Ardupilot y un ordenador. Se utiliza para cargar los Waypoints del vuelo en la placa programable, recibir datos de vuelo en tiempo real, realizar acciones, cambiar modos de vuelo etc. Si el vehículo pierde comunicación con el ordenador (estación de tierra) se puede configurar para que automáticamente el vehículo vuelva al lugar de lanzamiento, o siga la misión sin comunicación con tierra. Esto último no está permitido en la normativa de vuelo de vehículos autónomos en España.

Modulo GPS

Permite a la placa Ardupilot a conocer su posición GPS en tiempo real

Servomotor de la dirección

Servomotor que controla la dirección del Rover

Variador del motor

Funciona de forma similar a un servomotor; Regula la velocidad del motor del Rover

El sistema dos tipos de señales de control: Datos en forma digital y señales PWM para el control de los varios sistemas. Mas adelante, en la aeronave se le añadirá señales de video analógico.

Prueba del Rover Ardupilot

Se realizaron tres pruebas con el Rover. Los objetivos de las pruebas eran los siguientes:

Prueba 1 (Parc de la Ciutadella)

- Probar modos Manual y automático
- Probar pasar de modo automático a modo manual mediante la emisora
- Subir una misión con varios Waypoints y comprobar si es capaz de seguirlos

Prueba 2 (Parc de la Ciutadella)

- Probar fallo de conexión con la emisora en medio de una misión
- Probar fallo de conexión con la estación de tierra en medio de una misión
- Comprobar precisión GPS al repetir varias veces la misma misión y observar los puntos de paso del vehículo

Prueba 3 (Campus Nord)

- Encontrar el tiempo que tarda el sistema en estar listo para volar
- Probar el modo survey

45: Ruta GPS trazada en la prueba 2

Las pruebas 1 y 2 se realizaron sin ningún inconveniente. El vehículo se comportó fiablemente a los comandos que se le daban y cambiaba de modos mediante la emisora sin problema. El vehículo puede seguir los waypoints de las misiones establecidas sin problema.

Al desconectarse la emisora el vehículo sigue con la misión sin interferencias.

Al descontarse de la estación de tierra el vehículo realiza la acción configurada. Volver a el lanzamiento y esperar o seguir con la misión.

El vehículo tiene una precisión GPS más que aceptable, pasando consecutivamente por los mismos puntos sobre el terreno con meros centímetros de diferencia.

En la Prueba 3 apareció un problema en el cual la placa Ardupilot no era capaz de establecer contacto con los satélites GPS. Después de 20 minutos, no fue capaz de obtener señal. Al reiniciar la placa en 5 minutos ya disponía de posición GPS. Después de indagar en los logs de la placa y comprobar las conexiones entre la placa y la antena GPS no fui capaz de determinar qué era lo que impedía la conexión GPS. Todo y eso

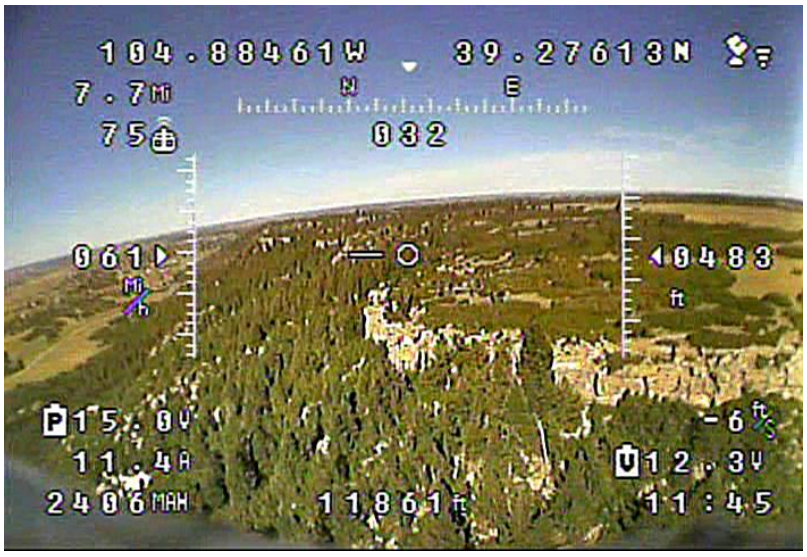
46:Rover conducido automáticamente por la placa Ardupilot

desconectar y volver a conectar la batería por tal de reiniciar la placa es una solución en el caso de que este evento se repita.

Después de las pruebas realizadas podemos afirmar que Ardupilot es una plataforma lo suficientemente estable, fiable y robusta como para que controle nuestra aeronave.

5.4.4 Sistema de video de abordo

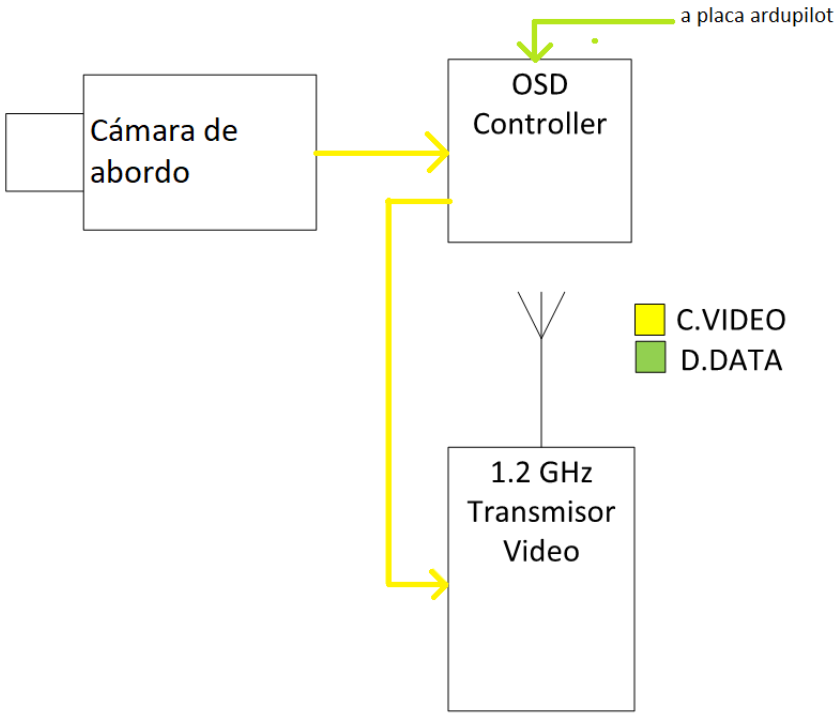
Según la normativa de vuelo de aeronaves no tripuladas española, el piloto no puede perder el contacto visual en ningún momento con la aeronave y en el caso que esto resulte imposible, debe tener comunicación directa con observadores que puedan ver durante todo el vuelo el aparato. La intención de esta norma es evitar que un aparato que pierda telemetría con la estación base se convierta en un riesgo para el mismo y para terceros que puedan encontrarse en su camino. Para añadir una capa extra de seguridad a nuestra aeronave vamos a incorporar un sistema de video de a bordo de tipo FPV (first person view). Este sistema constará de una cámara con visión frontal del aparato (como un piloto sentado en la cabina de este, de ahí el nombre Vista en primera persona (FPV)), Un sistema OSD (On-screen-display) que nos permitirá incorporar información dada por la placa Ardupilot, Un emisor y receptor de video analógico de 1.2 Ghz y una pantalla en tierra.



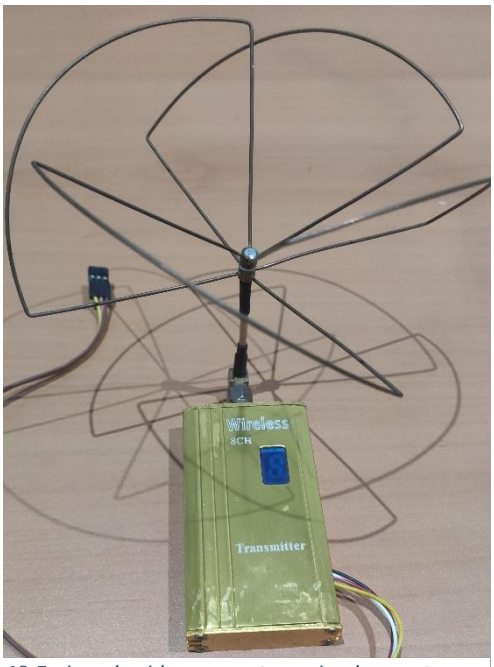
47:Captura realizada con un sistema de video FPV con OSD

Este sistema es independiente del sistema de telemetría y en el caso de que el enlace de telemetría con la estación de tierra falle, nos permitiría seguir viendo los datos de vuelo: Velocidad, voltaje de la batería, posición GPS, modo de vuelo ETC. Además de tener una referencia visual extra.

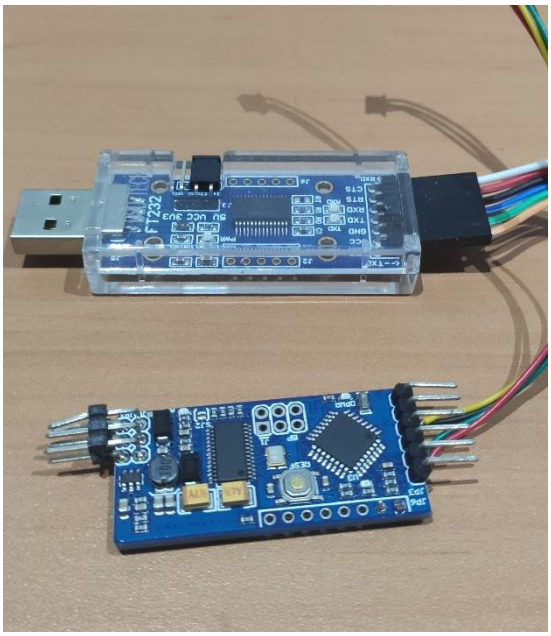
El sistema interactuará de la siguiente manera:



Los componentes escogidos son los siguientes:



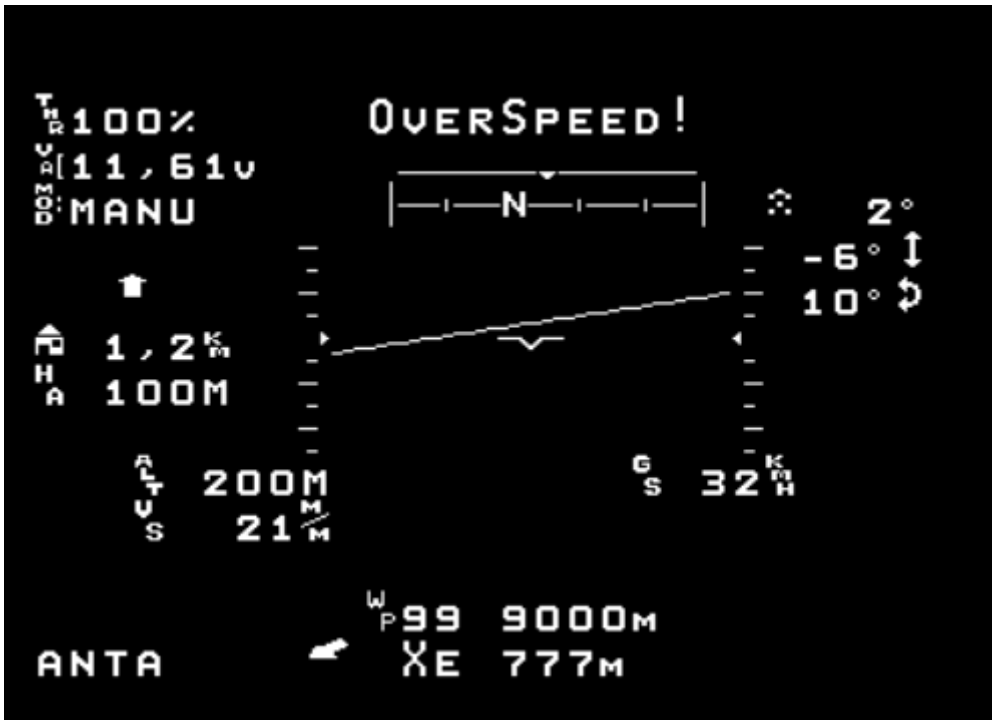
48:Emisor de video con antena circularmente polarizada



49:Controlador De OSD con su placa de programación

El emisor de video tiene una potencia nominal de 1000mW, haciéndola más que suficiente para cubrir el alcance visual del aparato.

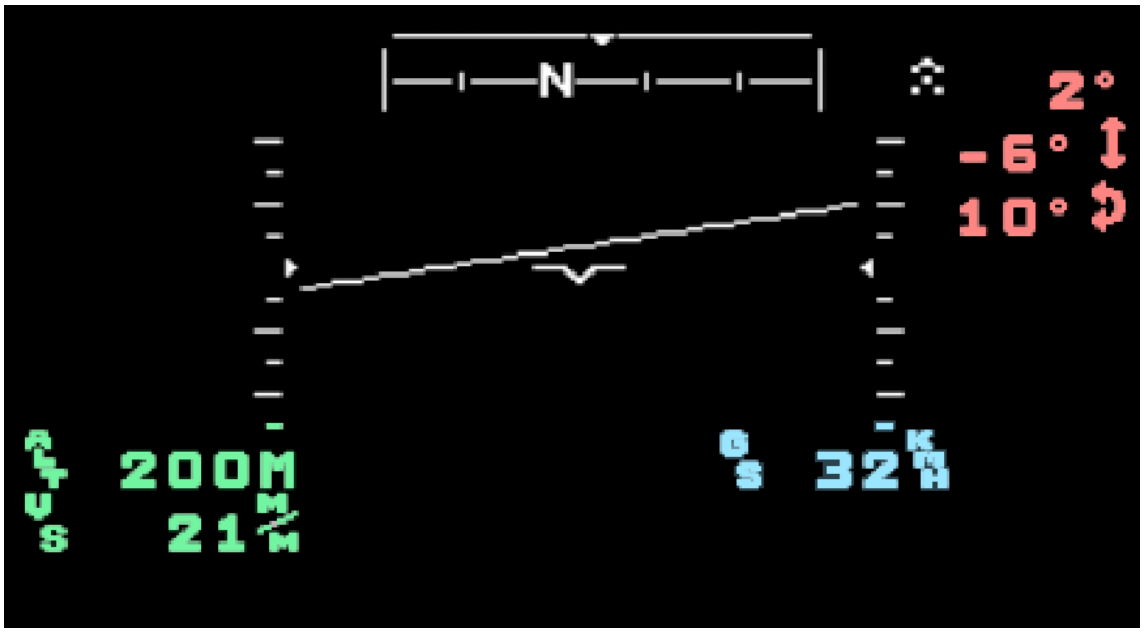
El siguiente paso es programar el controlador de OSD para que se comunique con la placa Ardupilot i diseñar un HUD (Heads Up Display) para nuestro OSD. El resultado es el siguiente:



50: HUD diseñada para el aparato

Esta HUD incorpora todo lo necesario para el control del aparato desde la pantalla. Ha sido diseñada para que enseñe la información en bloques clasificados y ordenados en temas de interés. Los temas de interés y los bloques son los siguientes

Bloque de control de vuelo



51:Bloque de control de vuelo

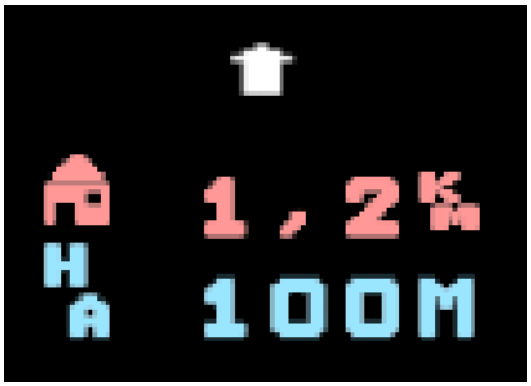
Este bloque es el que utilizaremos principalmente si volamos el aparato desde la cámara. Tiene toda la información necesaria para volar el aparato. Horizonte artificial y rosa de dirección en blanco, las tres inclinaciones del aparato en rojo, La velocidad en azul y la altitud absoluta y velocidad de ascenso/descenso en verde.

Bloque de estatus de la aeronave

52: Bloque de estatus de la aeronave

Este bloque nos transmite la información relativa al estado del a aeronave en la misión. Incluye La sección de advertencias en color blanco, el gas del motor del avión en color rojo, el voltaje de la batería en color verde y el modo de vuelo de la placa Ardupilot en color azul. La sección de advertencias enseña un mensaje siempre que la placa Ardupilot encuentre un parámetro de la aeronave fuera de lo común. Estos mensajes se hacen presentes en un punto central ya que normalmente requieren la máxima atención del piloto.

Bloque de retorno a casa



En el caso que el piloto tenga que pilotar manualmente el vehículo al punto de lanzamiento esta sección es de vital importancia. Indica la dirección al punto de lanzamiento mediante una flecha en color blanco, La distancia al punto de lanzamiento en color rojo y por tal de evitar colisiones con el suelo, la altura del punto de inicio en color azul.

53:Bloque de retorno a casa

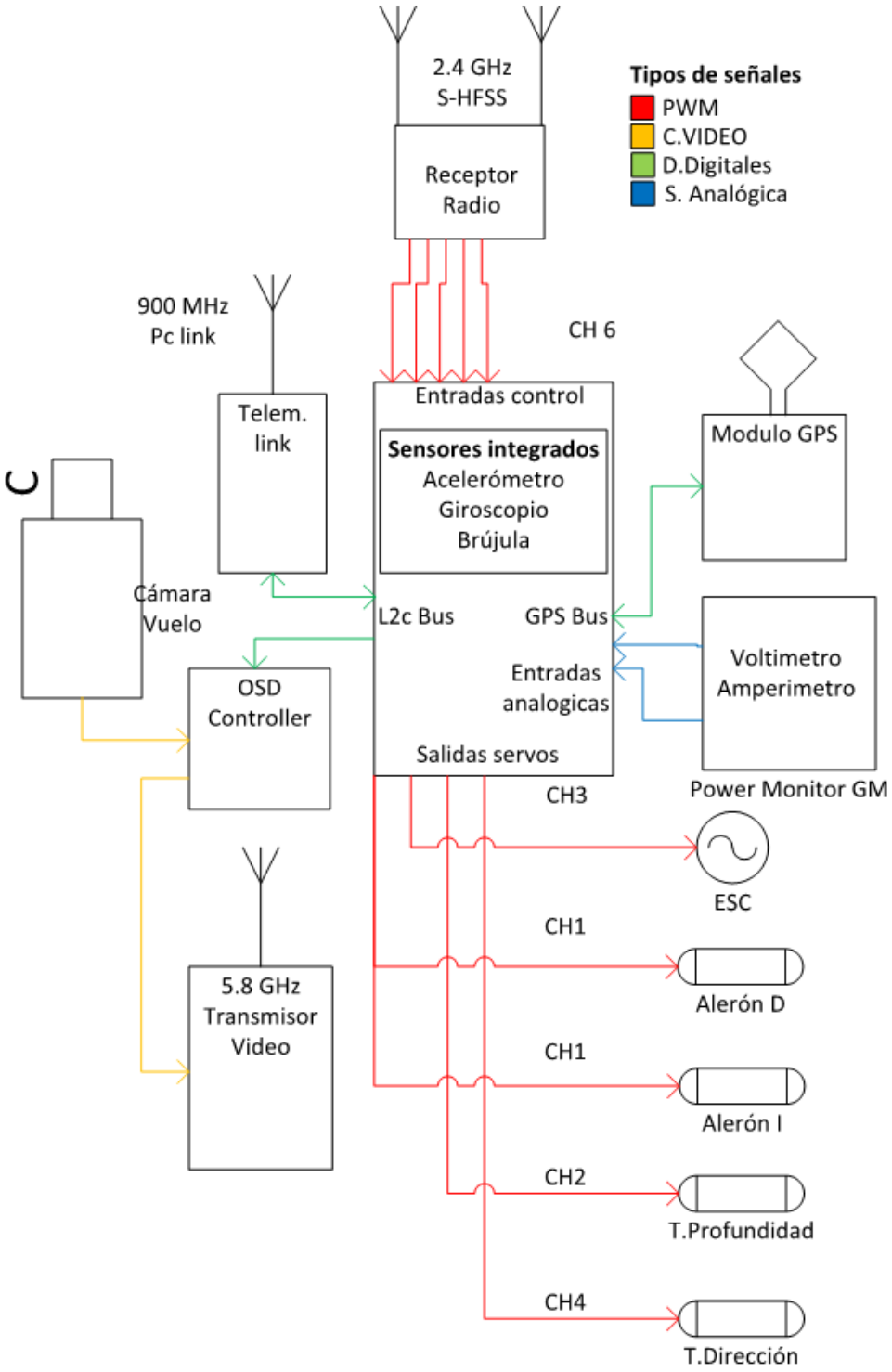
Bloque de información de la misión

54:Bloque de información de la misión

Este bloque contiene información de la misión en curso. Se utiliza para comprobar que la aeronave vuele correctamente entre los waypoints establecidos. Incluye información del siguiente waypoint (Numero del mismo, distancia a él etc.) en color blanco, flecha de dirección hacia el waypoint en color rojo y nombre del aparato en color azul.

5.4.5 Esquema de sistemas completo

Ahora que ya tenemos todos los componentes del sistema de control determinados vamos a ver como interactúan entre ellos. El núcleo central de todo el procesado es la Placa Ardupilot. Existen varios tipos de señales de control; PWM recibido de la emisora y transferido a la placa Ardupilot la cual controla el motor y los servomotores con el mismo tipo de señal. Las señales digitales binarias que permiten la comunicación de la placa con la estación de tierra mediante el enlace de telemetría, el controlador de la HUD, El módulo GPS. La señal de video que conecta la cámara añade la HUD y lo envía a tierra con el transmisor de video. Por último, la señal analógica con la que el Power Monitor se comunica con la Placa Ardupilot.



55: Diagrama de sistemas de control

5.5 SISTEMA ELÉCTRICO DE LA AERONAVE

Toda aeronave necesita una fuente de energía para generar sustentación. Los grandes aviones comerciales utilizan la energía química presente en los combustibles derivados del petróleo; la cantidad de combustible que lleva la aeronave uno de los factores más importante al determinar el alcance, o tiempo de vuelo, de la misma. Una vez se queda sin combustible los motores dejan de funcionar i el avión planeara, reduciendo lentamente su altitud hasta llegar al suelo. Nuestro avión no es diferente, también necesita una fuente de energía para poder volar y dar energía a sus sensores y sistemas; la única diferencia será que en vez de utilizar combustibles fósiles utilizará energía eléctrica. Los aviones impulsados por energía eléctrica funcionan en una forma similar a los impulsados por combustibles fósiles, en vez de litros de combustible, la capacidad energética se mide en los Amperios que puede proporcionar una batería al largo del tiempo. Por ejemplo, una batería con 2 Ah (amperios * hora) puede proporcionar 2 amperios a lo largo de 1 hora hasta agotarse.

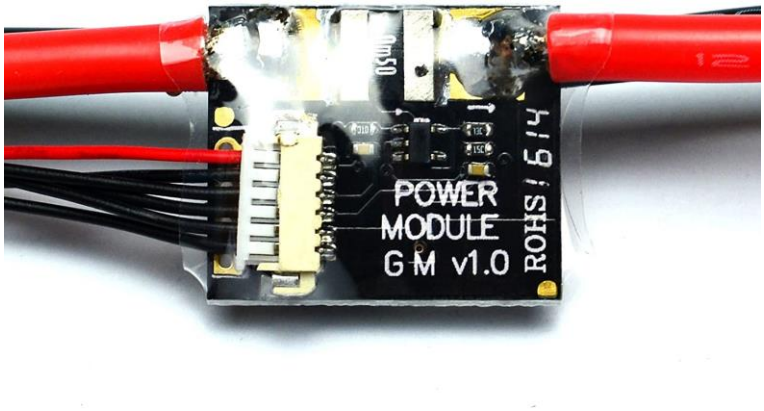
Con la intención de poder comparar directamente el rendimiento de la aeronave y el cuadricóptero con el que hicimos las pruebas utilizaremos una batería similar. Hay que añadir que la autonomía de la aeronave se puede augmentar considerablemente al utilizar baterías con más capacidad o varias baterías siempre y que no exceda el peso máximo en despegue o MTOW (*Maximum Take-Off Weight*).

La densidad energética de una batería es extremadamente importante para su uso en aplicaciones aeronáuticas. La densidad energética establece la cantidad de Joules por gramo que pueden almacenar. Por lo tanto, a una densidad energética más grande, **más** Ah podrá subministrar la batería para un peso dado. En la actualidad el mejor tipo de baterías en cuanto a precio, densidad energética y capacidad de amperaje son las baterías de Litio, en concreto las Li-Po (Lithium polymer battery).

56: Batería Turnigy 2.2 Ah

Hemos escogido para la aeronave una batería de la marca “Turnigy” de 11.1v y 2.2 Ah, datos técnicos muy parecidos a la batería del cuadricóptero con el cual hemos realizado la prueba.

Para poder volar de forma segura necesitamos alguna forma de monitorear la cantidad de energía o “combustible” que le queda a la batería. Existe un producto llamado “Power Module GM” que está diseñado para realizar exactamente esta tarea. Incorpora un BEC que subministra 5V para los sistemas de control del aparato, un voltímetro y un amperímetro. Se conecta directamente a la placa Ardupilot y mediante una señal analógica le da información a la placa sobre el voltaje y consumo de la aeronave.

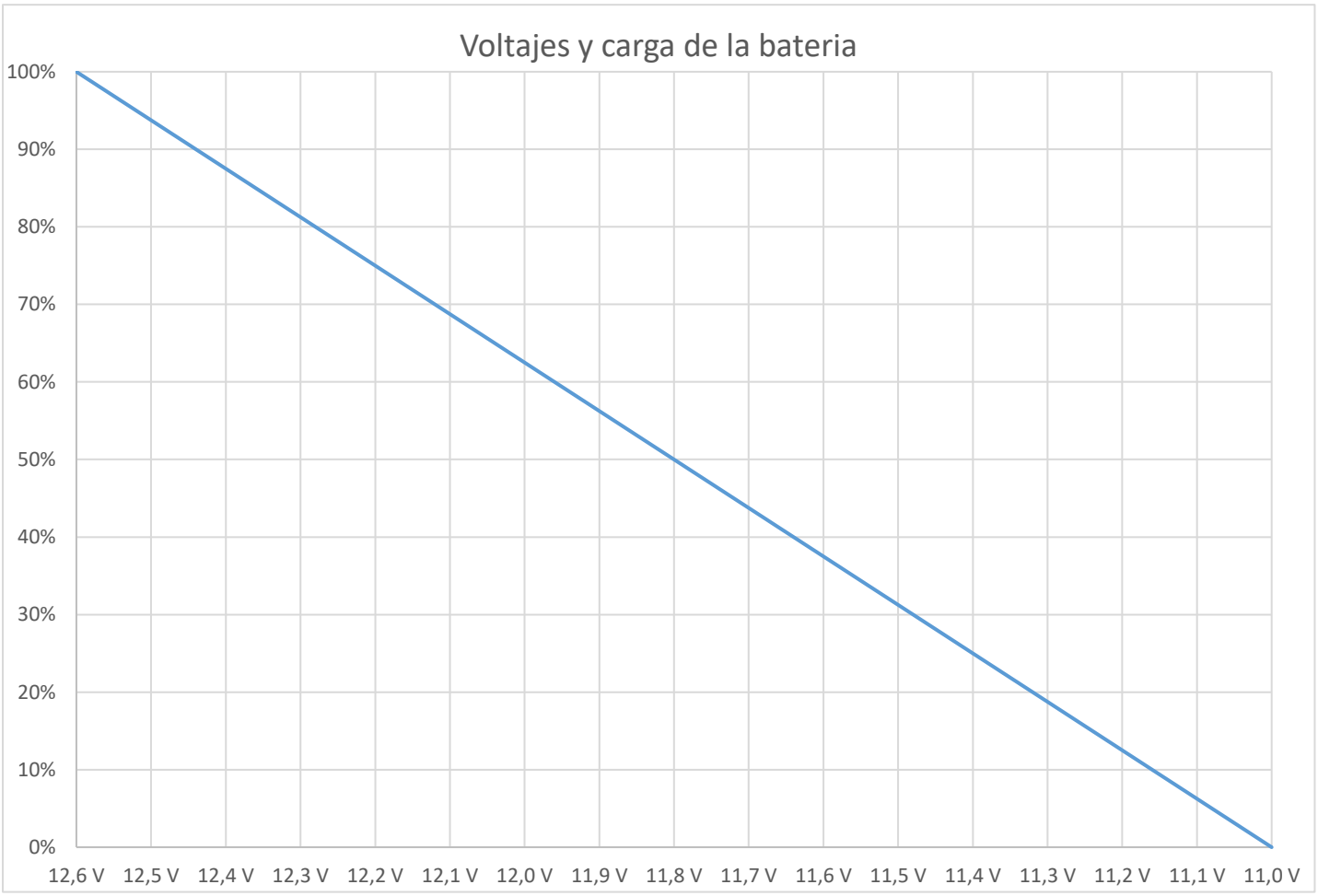


57:*Power Module GM 1.0*

Después de calibrar el voltaje y consumo mediante una fuente de alimentación y realizar varias pruebas he observado que todo y que el voltímetro es sorprendentemente preciso, el amperímetro incluido no es del todo fiable. Por lo tanto, para determinar el estado energético de la batería utilizaremos el voltaje.

Para ello necesitamos las curvas de carga de la batería en función de su amperaje y voltaje. Las obtenemos mediante un cargador inteligente con data-logging.

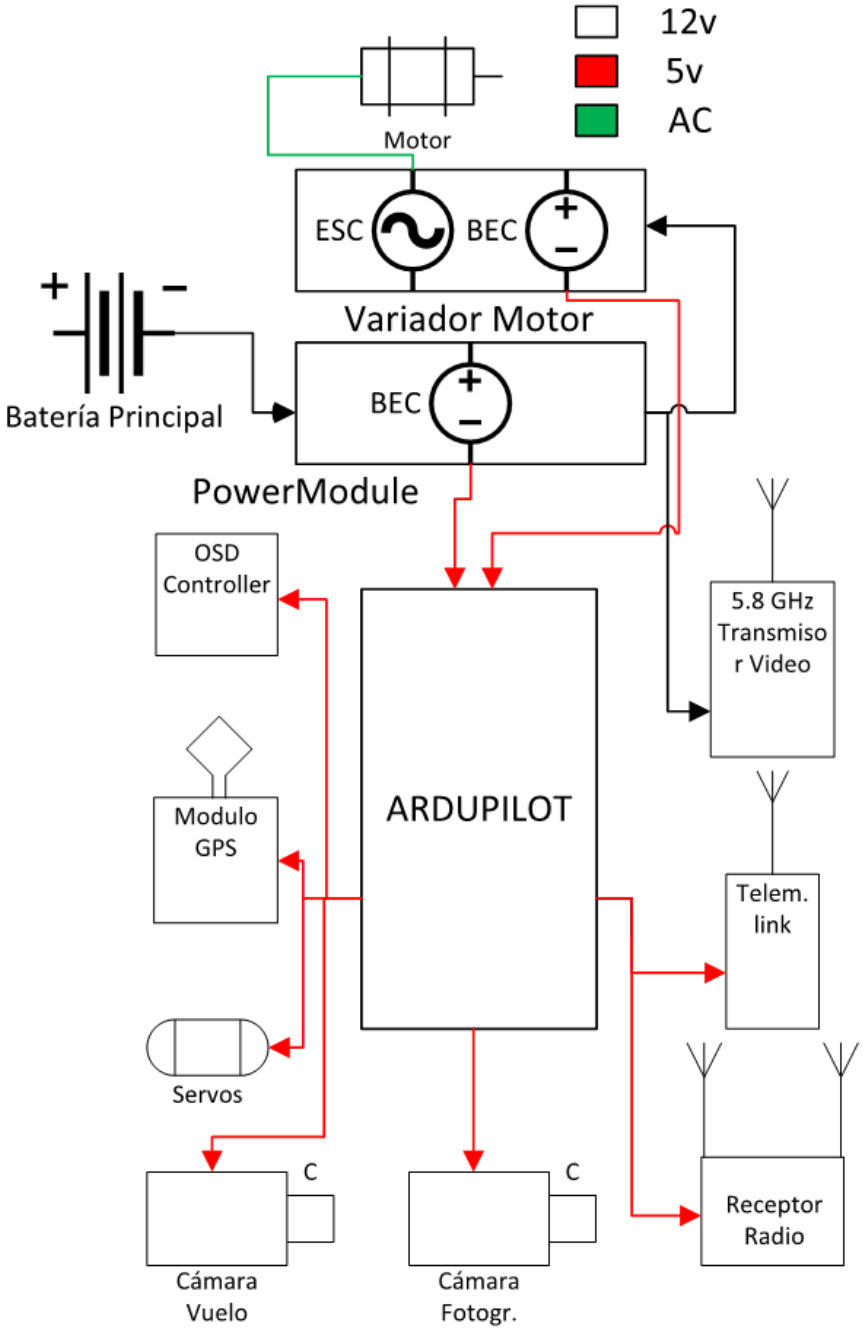
Después de procesar los datos en Excel obtuvimos la gráfica que relaciona el % de carga con el voltaje de la batería, Se han dado 200 MAh extra de margen de seguridad, es decir, que cuando la batería este a 0% según la gráfica la batería tendrá aún 200Mah que dar.



Este grafico nos servirá para estimar la capacidad restante de la batería a lo largo del vuelo. Al augmentar la cantidad de amperios que subministra la aeronave el voltaje se reduce por culpa de la carga, en otras palabras, la estimación que obtendremos siempre será ligeramente inferior a la real, eso nos pone en el lado de la seguridad dado que si aterricemos la aeronave con 11V realmente tendremos aproximadamente entre un 30% y un 40% más carga.

Ahora que tenemos todos los componentes determinados podemos diseñar como funcionara el sistema eléctrico. Los componentes todos funcionan con corriente continua de 12v o 5v. Por lo tanto, diseñaremos un sistema con dos carriles; uno de 12v y uno de 5v

El esquema eléctrico resultante es el siguiente:



El carril de potencia más importante es el de 5v, dado que, si fallase el de 12v generado por el PoweModule, todo y que no contaríamos con video ni con el motor, el avión seguiría estado controlado y podríamos aterrizarlo planeando.

El carril de 5V esta generado por dos BECs, eso asegura la redundancia de manera que si uno de los BECs fallase seguiríamos teniendo energía en el carril de 5v. La placa Ardupilot hace de nodo de distribución principal para el carril de 5v.

El sistema eléctrico de la aeronave en parado consume 0.72 amperios.

5.6 ELECCIÓN DEL AERONAVE

En vez de desarrollar desde 0 un fuselaje, por tal de ahorrar tiempo, dinero, facilidad de producción de prototipos y la falta de fiabilidad inicial de una aeronave diseñada desde cero utilizaremos un fuselaje ya existente. En el mundo del aeromodelismo hay un gran catálogo de modelos. Son robustos y fiables algunos con muchos años de desarrollo y modificaciones a sus espaldas que los hacen una buena. Nuestra aeronave tendrá que volar a velocidades moderadas, con una gran estabilidad, capacidad de carga y eficiencia. Para ello requeriremos una aeronave con una sección transversal pequeña, con un perfil aerodinámico y alas de grandes dimensiones por tal de mantener la eficiencia y estabilidad en vuelos a velocidades moderadas.

58: Planeador motorizado Taurus M

Existe una categoría de aeronaves que cumplen esta descripción: Los motoveleros.

Un motovelero es un planeador que incorpora un motor para poder realizar vuelos motorizados. Los planeadores son aeronaves que requieren de coeficientes de fricción muy reducidos y alas de grandes dimensiones para poder surcar los cielos durante grandes distancias sin el uso de un motor. Al añadirle un motor tenemos una plataforma estable, eficiente y con una buena capacidad portante.

En el mundo del aeromodelismo también existen también este tipo de aeronaves.

59: E-Flite EFL4750

Existen una gran variedad de modelos en diferentes configuraciones y tamaños.

Hemos de buscar un modelo con las siguientes características:

- Motor en configuración “Pusher”

En otras palabras. Que el motor no se ubique en la popa del aparato; De esta manera tenemos toda la parte frontal del aparato libre de componentes del motor teniendo así más espacio para colocar nuestras electrónicas y cámaras. Además, la presencia de una hélice en la proa del avión dificulta la visión de la cámara FPV del aparato.

- Modelo con fuselaje ancho

Si queremos colocar todos los equipos que necesitaremos tendremos que sacrificar un poco de sección transversal por tal de que pueda acomodar todos los componentes fotogramétricos y de control que utilizará

- Construcción de EPP (Expanded Polyolefin)

Este material, de apariencia similar al Porex pan, es extremadamente ligero y tolerante a impactos y deformaciones, algo que es necesario cuando se realizan despegues y aterrizajes en terrenos sin pista preparada.

- Carga alar inferior a 60g/dm^2

De acuerdo con Martin Simons en *"Model Aircraft Aerodynamics [1]"* Para evitar la falta de sustentación y estabilidad en modelos RC la carga alar del mismo tiene que aproximarse en la medida de lo posible a 60g/dm^2. La carga alar se determina mediante el peso del aparato y la superficie alar del mismo. El peso del aparato lo podemos estimar como la suma de todos los componentes de control, energía y equipo fotogramétrico. Así que una vez tengamos determinado el peso hemos de buscar un avión con la superficie alar que mejor se ajuste a este número.

Procedemos a obtener el peso.

Componente	Peso	Unidades	Peso (g)
Cámara Fotogram.	93,37	1	93,37
Emisor Video 5,8GHz	26,18	1	26,18
Enlace telemetría 900 Mhz	20,41	1	20,41
batería 11v 2.2Ah	187,24	1	187,24
Placa Ardupilot	42,56	1	42,56
Modulo GPS Ardupilot	32,1	1	32,1
Receptor Radiocontrol	8,79	1	8,79
Modulo Control Potencia	19,5	1	19,5
Modulo OSD	6,1	1	6,1
Servomotor	16,8	6	100,8
Motor + variador	139,91	1	139,91
Cámara FPV	11,6	1	11,6
Peso Total		688,56	gramos

El número de servomotores escogido es el número de servomotores máximo que podría llevar un chasis RC estándar.

60: Bixler 2 equipado para vuelo FPV

Teniendo en cuenta las características del fuselaje que buscamos una opción a considerar es el modelo "Bixler 2" del fabricante "Hobbyking". Es uno de los modelos que más se ajusta a nuestros requisitos. Dispone de una gran envergadura (154cm), extremos alares con diedro positivo (inclinación del ala hacia la parte superior) que le dan una gran estabilidad en vuelo, Motor en configuración pusher manteniendo un fuselaje convencional, Perfil aerodinámico, Fuselaje ancho con mucha capacidad interior, construcción en EPP etc.

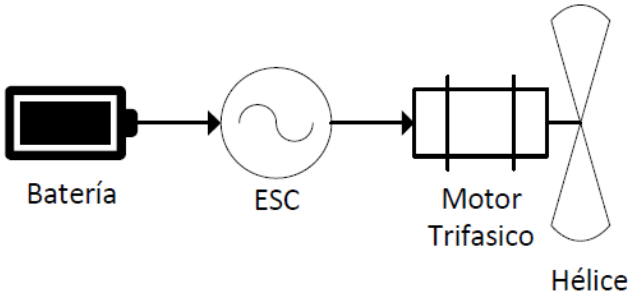
Teniendo en cuenta su superficie alar y el peso que tendrá que llevar vamos a comprobar la carga alar estimada:

Carga Alar g/dm2	30,426867	Carga alar máxima g/dm2	60	
% carga	50,71%		largo (dm)	Ancho (dm)
Superficie Alar	22,63	Dimensiones ala	6,2	1,825

Como podemos observar la carga alar esta al no supera el 50% del valor máximo recomendado. Por lo tanto, este modelo será el que utilizaremos en este proyecto; todo y eso algunas modificaciones serán necesarias, hablaremos de ello en los siguientes apartados.

5.7 ELECTRÓNICAS PROPULSIÓN

Las aeronaves de ala fija no requieren motores para generar sustentación, las alas son las la generan. Todo y eso para que se pueda producir se requiere una velocidad horizontal en el sentido del perfil alar. Esta velocidad la genera el motor que mediante una hélice genera un empuje el cual, por acción-reacción, empuja la aeronave generando en ella una velocidad. Nuestra aeronave no es diferente. Como utilizaremos un motor trifásico (dado que es el tipo de motor eléctrico que mayor eficiencia nos dé en este tipo de aeronaves) también necesitaremos de un variador trifásico y una batería que lo alimente, por lo tanto, nos queda el siguiente esquema:



61: Esquema sistema propulsión

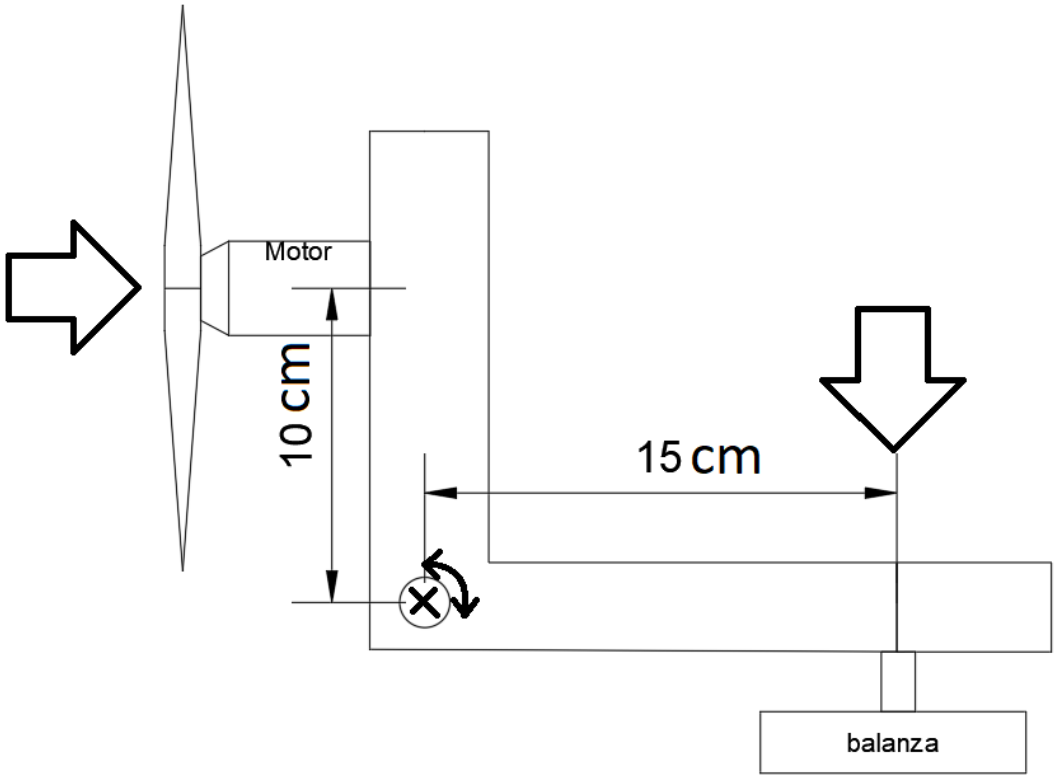
El fabricante del fuselaje recomienda el uso de un ESC mínimo 3S (12v) con 20 A de Amperaje, un motor de 2620KV a 1300KV y una batería de 2.2Ah y 3S y una hélice de 7’ de diámetro con un paso de 5’

Dado que incrementaremos el peso ligeramente utilizaremos componentes ligeramente más potentes. Las especificaciones de los componentes son las siguientes:

- Motor trifásico de 1350 KV
- ESC de 30 A 12V
- Hélice de 7’x5’

5.7.1 Prueba de empuje

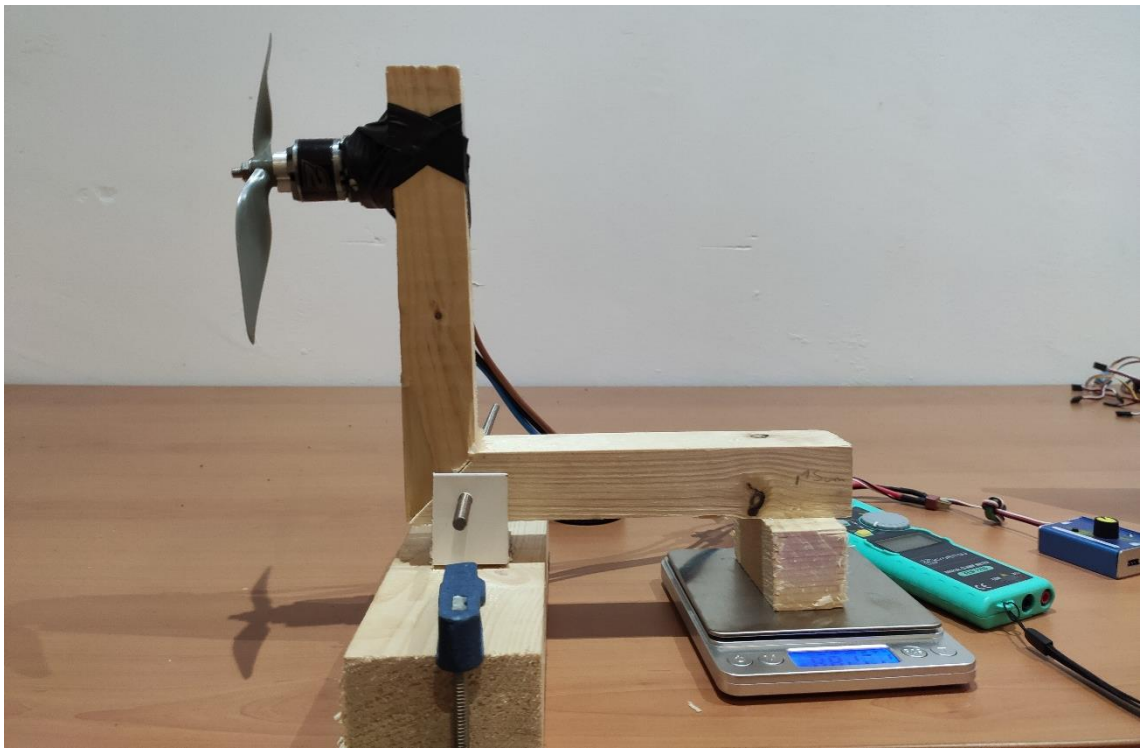
Con la intención de comprobar que el empuje que genera el motor es suficiente y que el motor es capaz de mantener la potencia sin sufrir ningún daño vamos a construir una plataforma que nos permitirá medir el empuje del motor. Constará de un brazo basculante y una balanza para medir la fuerza que genera el motor.



62: Funcionamiento del aparato de prueba del motor

La diferencia en longitud de los brazos es para evitar sobrecargar la balanza. El peso de la balanza tiene que ser multiplicado por 1.5 para obtener el empuje real.

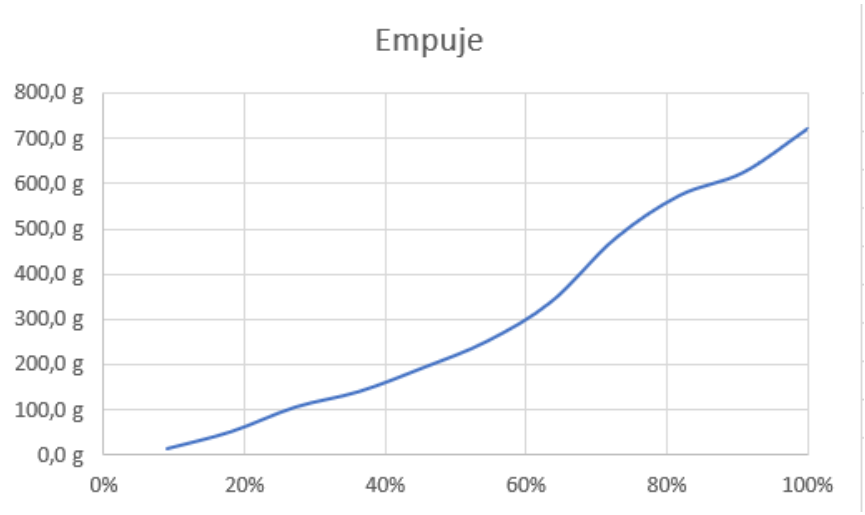
Después de construir el banco de pruebas y montarlo en una mesa procedimos a la prueba.



63: Banco de pruebas listo para el ensayo

Obtuvimos la siguiente curva de empuje:

Gas %	Empuje
9%	15,0 g
18%	52,5 g
27%	106,5 g
36%	141,0 g
45%	193,5 g
55%	252,0 g
64%	339,0 g
73%	478,5 g
82%	573,0 g
91%	624,0 g
100%	720,0 g



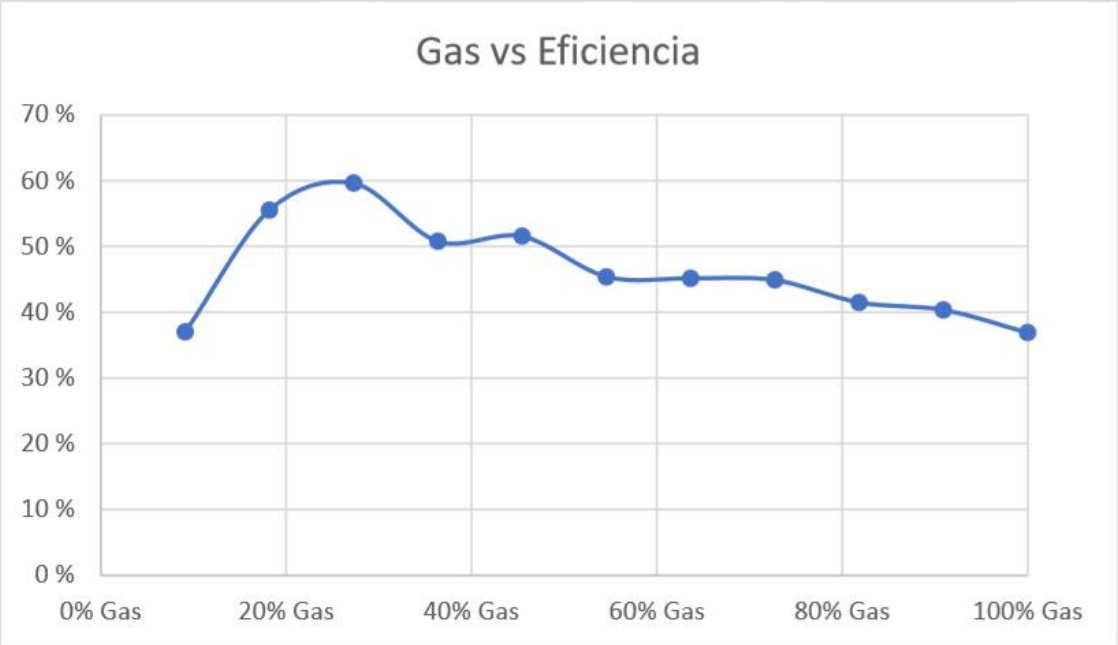
Los componentes sufrieron un calentamiento moderado después de funcionar constantemente durante 30 minutos.

5.7.2 Prueba de consumo y empuje

Ahora vamos a realizar la misma prueba otra vez, pero esta vez mediremos el amperaje que gasta el motor a la vez que medimos su empuje. Esto nos servirá para tener una idea de que tiempo de vuelo podemos esperar del aparato. También podremos ver en que rango de gas el sistema es más eficiente y cuando programemos

los vuelos hacer que tienda hacia estos valores. Después de realizar la prueba obtuvimos los siguientes resultados:

	Empuje	Consumo Total	Potencia	eficiencia
9%	15 g	0,27 A	2,97 W	37,04%
18%	53 g	0,63 A	6,93 W	55,56%
27%	107 g	1,19 A	13,09 W	59,66%
36%	141 g	1,85 A	20,35 W	50,81%
45%	194 g	2,50 A	27,50 W	51,60%
55%	252 g	3,70 A	40,70 W	45,41%
64%	339 g	5,00 A	55,00 W	45,20%
73%	479 g	7,10 A	78,10 W	44,93%
82%	573 g	9,20 A	101,20 W	41,52%
91%	624 g	10,30 A	113,30 W	40,39%
100%	720 g	13,00 A	143,00 W	36,92%



Podemos observar un pico en la eficiencia del motor en torno al 25% de gas.

Ahora que tenemos todos los datos podemos pasar a la siguiente fase.

5.7.3 Estimación alcance de la aeronave.

Cualquier objeto en caída libre en la atmosfera terrestre tiene una velocidad terminal. La velocidad terminal es la velocidad a la que tiene que viajar un objeto determinado para que la fuerza de su peso y la fricción aerodinámica sean iguales. Esta fuerza de fricción aerodinámica, también llamada “Drag” se expresa mediante la siguiente formula:

$$D = Cd \times \frac{\rho \times V^2}{2} \times A$$

Siendo Cd el coeficiente de fricción del objeto, gamma la densidad del aire, A la sección del objeto y V la velocidad.

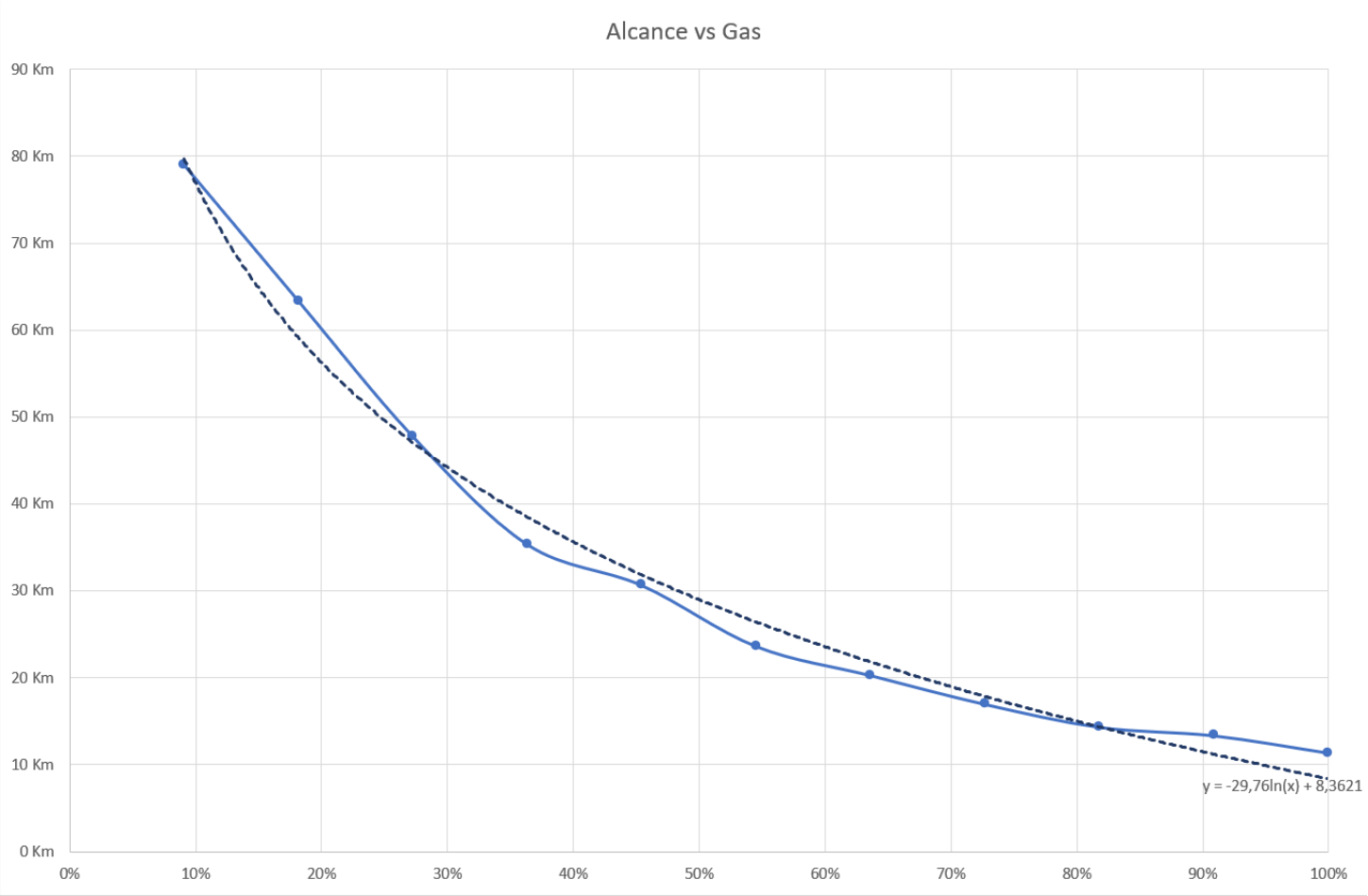
Una aeronave también tiene una velocidad terminal para un determinado empuje del motor. Si la aeronave no está ascendiendo ni descendiendo la velocidad terminal ocurre cuando el empuje del motor es igual a la fricción aerodinámica que genera el aparato. De esta manera podemos estimar el tiempo de vuelo, velocidad y alcance. Para ello igualamos la fuerza de fricción aerodinámica a el empuje del motor.

Esto nos permitirá encontrar una velocidad aproximada a la que volará el avión en vuelo estable nivelado. Combinando esta velocidad aproximada junto a los datos obtenidos en los apartados anteriores podemos encontrar el tiempo de vuelo aproximado. Como tenemos también la velocidad, también encontraremos el alance de la aeronave.

Hay que tener en cuenta que estos cálculos son una aproximación. La velocidad de vuelo depende también de otros factores como el ángulo de ataque del ala, condiciones de viento Etc. Estos resultados no son una previsión del alcance real de la aeronave, son una forma de obtener un rango de gas donde el avión será más eficiente.

Obtenemos los siguientes resultados (Obtenidos con Cd = 0.05 y la sección del avión incluyendo alas, fuselaje y timones de profundidad y dirección)

% Gas	Velocidad	Tiempo vuelo	Distancia Vuelo
9,1%	9,7 km/h	488,9 min.	79,0 km
18,2%	18,1 km/h	209,5 min.	63,4 km
27,3%	25,8 km/h	110,9 min.	47,8 km
36,4%	29,7 km/h	71,4 min.	35,4 km
45,5%	34,8 km/h	52,8 min.	30,7 km
54,5%	39,7 km/h	35,7 min.	23,6 km
63,6%	46,1 km/h	26,4 min.	20,3 km
72,7%	54,8 km/h	18,6 min.	17,0 km
81,8%	59,9 km/h	14,3 min.	14,3 km
90,9%	62,5 km/h	12,8 min.	13,4 km
100,0%	67,2 km/h	10,2 min.	11,4 km



Dado que las aeronaves de ala fija tienen una velocidad mínima para poder mantener un vuelo estable, los valores de gas inferiores al 25% quedan descartados dado que la velocidad es relativamente baja. Un rango de gases que combina un alcance decente con una velocidad razonable sería del 30% al 60%

6 CONSTRUCCIÓN Y MODIFICACIONES DEL FUSELAJE

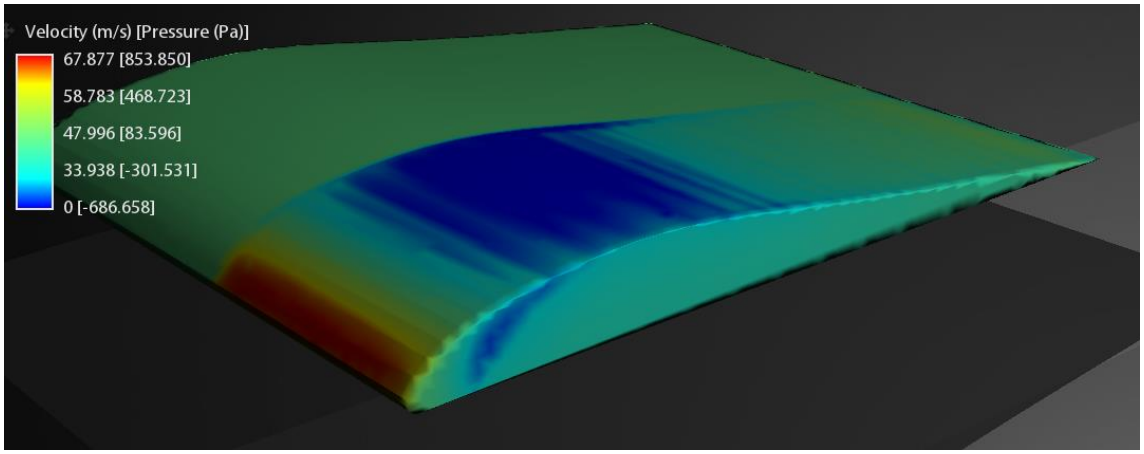
Ahora que ya tenemos determinados todos los sistemas y equipos con los que será equipada la aeronave, determinaremos su posición y distribución dentro de la misma y procederemos a la construcción de la aeronave.

6.1 CENTRO DE GRAVEDAD Y CENTRO DE PRESIÓN

Todo objeto con masa tiene un centro de gravedad. El centro de gravedad es el punto imaginario de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas porciones materiales de un cuerpo, de tal forma que el momento respecto a cualquier punto de esta resultante aplicada en el centro de gravedad es el

mismo que el producido por los pesos de todas las masas materiales que constituyen dicho cuerpo.

Cuando la aeronave está en vuelo, la sustentación es generada por las alas. Las alas son mecanismos aerodinámicos que generan sustentación al generar una diferencia de presión entre su parte superior y su parte inferior causada por la diferencia de velocidad de las partículas de aire que recorren las dos partes. El perfil geométrico del ala hace recorrer una distancia mayor a las partículas que pasan por ella.

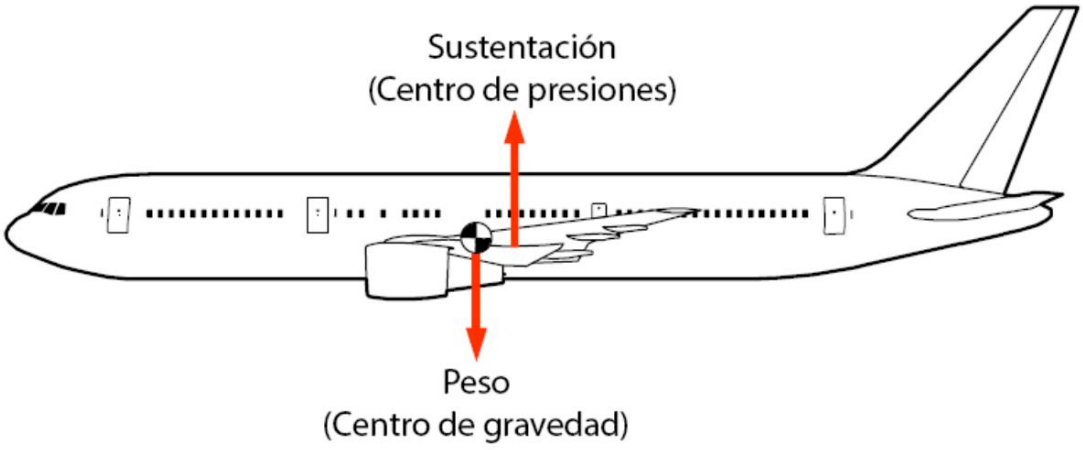


64: Simulación de presiones en un perfil alar

Como podemos observar en la imagen 66 tenemos una zona de baja presión en la parte superior. Este fenómeno es lo que genera la sustentación.

Dado que el fenómeno genera una diferencia de presión, el perfil alar tendrá un centro de presiones.

Se denomina centro de presión de un cuerpo al punto sobre el cual se debe aplicar la resultante de todas las fuerzas ejercidas por el campo de presión sobre ese cuerpo para que el efecto de la resultante sea igual a la suma de los efectos de las presiones.



Si el centro de gravedad y el centro de presiones están alineados, no se genera ningún momento en la aeronave y por lo tanto se mantiene estable en una inclinación determinada. Si existe una disparidad entre el centro de presiones y gravedad, en el

caso que sea leve el timón de profundidad puede generar una fuerza que contrarreste el momento generado y lo mantenga estable. Todo y eso la disparidad tiene un límite. En casos extremos en el que el centro de gravedad tiene una gran disparidad con el centro de presiones, el avión puede incontroladamente inclinar la proa hacia el suelo o hacia el cielo sin posibilidad de recuperación. Eso puede producir una colisión tal como pasó en el vuelo "National Airlines Flight 102" el 29 de abril de 2013.

65: Boeing 747 involucrado en el accidente

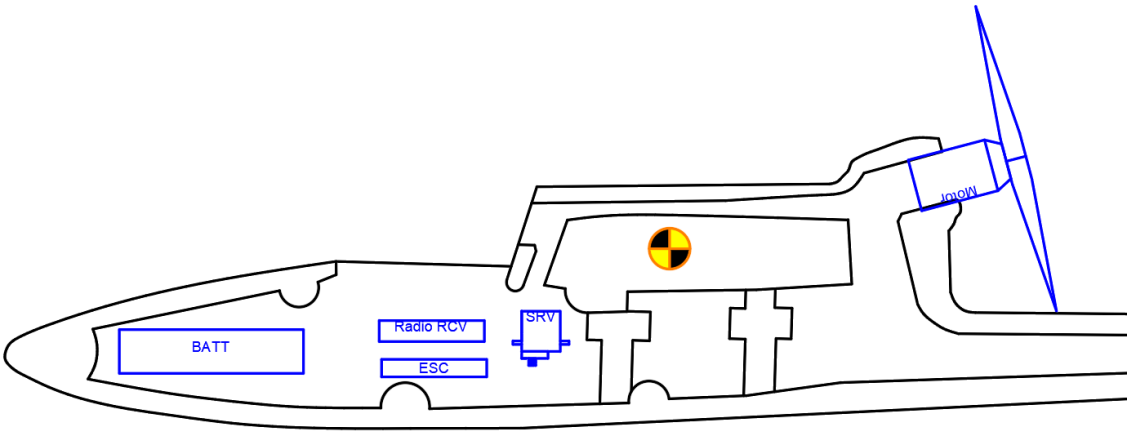
El avión despegaba de "Camp Bastion" en Afganistán cargado con camiones militares distribuidos a lo largo de su fuselaje. Un peso total de 80 toneladas.

Durante el despegue una de las fijaciones de un vehículo militar falló provocando que varios vehículos se moviesen a la cola de la aeronave. El centro de gravedad de la aeronave rápidamente salió del rango tolerable y produjo que la aeronave se inclinase violentamente hacia el cielo. El avión perdió velocidad y las alas no pudieron sustentar el aparato, provocando que el mismo se desplomara contra el suelo.

Nuestro avión no es diferente y cuando diseñemos donde pondremos cada uno de los componentes deberemos tener en cuenta la posición del centro de gravedad y ubicarlos dentro del fuselaje de manera que puedan realizar su función y la aeronave tenga un vuelo estable.

6.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES EN EL FUSELAJE

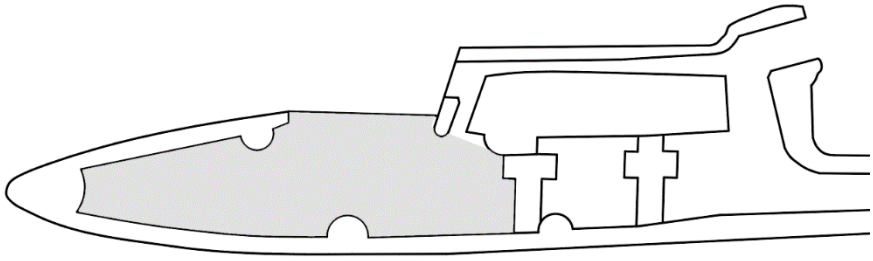
El avión fue diseñado en un origen como un planeador de iniciación radiocontrol. No está pensado en un origen para llevar todo el equipo que tendrá que llevar. En su configuración estándar sus componentes se ubican en el fuselaje con el siguiente esquema.



66: Distribución de componentes en estado original

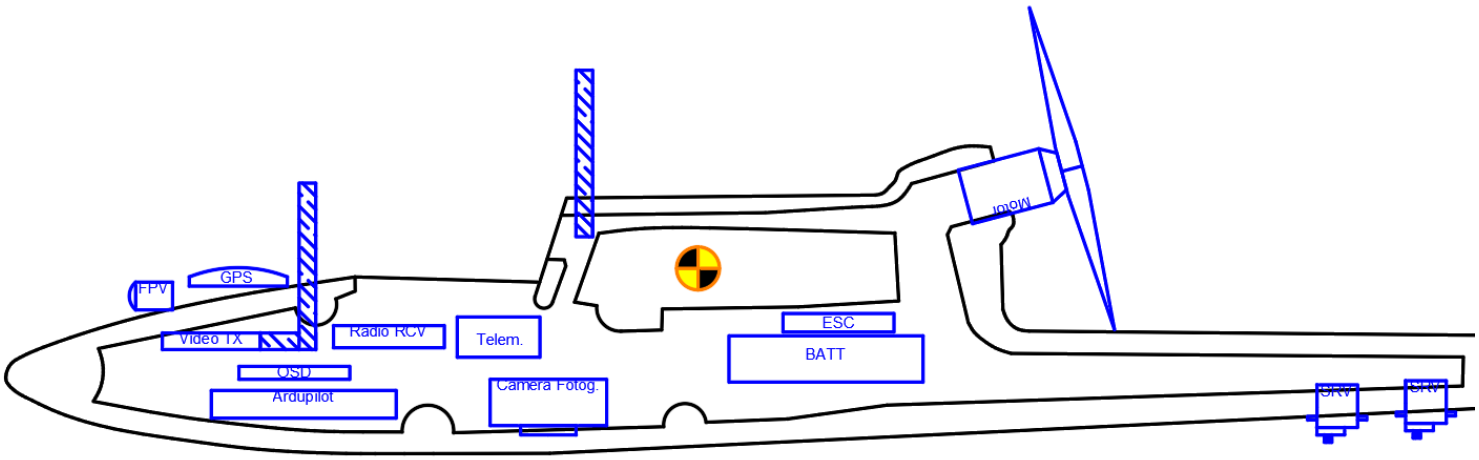
En esta configuración el centro de gravedad (marcado en amarillo y negro) se encuentra en el lugar adecuado del ala para producirse un vuelo estable.

En su configuración estándar solo la zona delantera del avión esta libre para poder poner equipo, marcado en color gris en la ilustración 69. Si ponemos todo el equipo que tiene que llevar la aeronave en la proa de este movería el centro de gravedad del avión demasiado hacia adelante. Esto generaría una tendencia difícil de corregir donde el avión estaría constantemente intentando apuntar el morro hacia el suelo, provocando excesivas correcciones por el timón de profundidad.



67:Zona interior libre

Con la intención de poder aprovechar mejor el espacio interior de la aeronave realizaremos extensivas modificaciones al fuselaje con la intención de conseguir una distribución parecida a la siguiente:



68:Configuración propuesta

Esta configuración asegura que el centro de gravedad estará en el lugar correcto, que los componentes tienen refrigeración adecuada, que ningún objeto perturbe fuera del fuselaje, augmentado su eficiencia aerodinámica, que la batería es de fácil acceso y reemplazo etc.

Todo y eso para conseguir esta configuración extensivas modificaciones se han de realizar a varios componentes; incluyendo

- Espacio interior del fuselaje
- Sistema de sujeción de las alas
- Carlinga
- Soporte Antena GPS y cámara
- Sistema de servomotores.

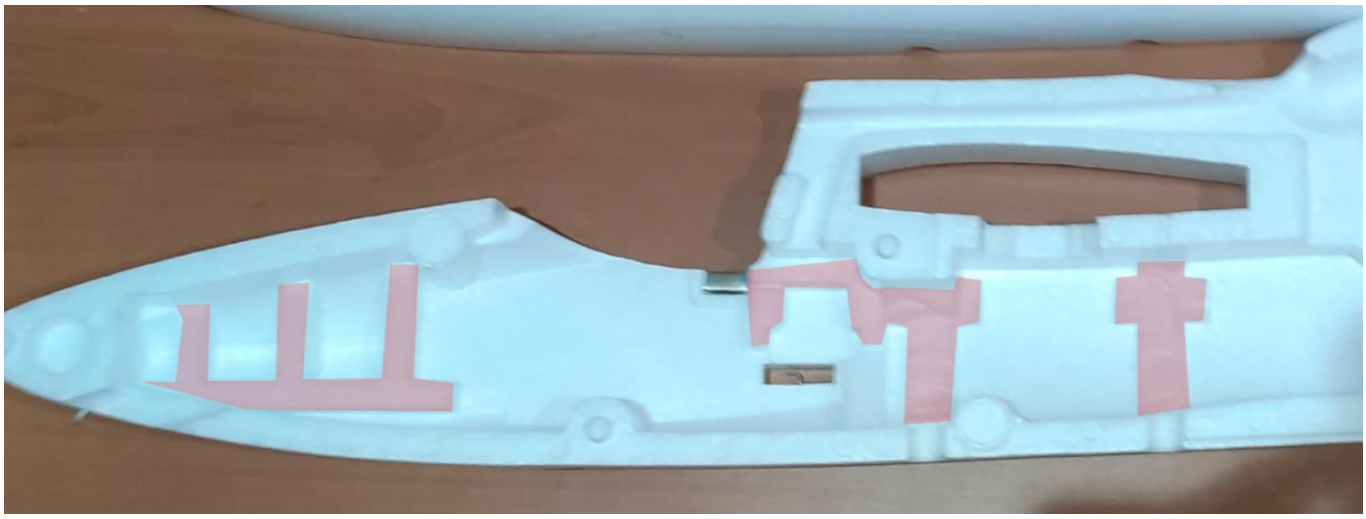
En los siguientes apartados detallaremos el proceso de diseño y realización de las modificaciones además de las piezas diseñadas y construidas para las mismas.

6.3 MODIFICACIONES DEL AVIÓN

6.3.1 Modificaciones del interior del fuselaje

El fuselaje cuenta en su interior con ciertas protuberancias de foam EPP diseñadas para evitar el movimiento de ciertos componentes, como la batería en el morro. Para augmentar su espacio interior vamos a recortar las siguientes zonas hasta que no sobresalgan respecto del fuselaje. En la imagen 71 observamos de color rojo las zonas que vamos a recortar.

Para recortar todas las piezas de foam utilizaremos el método del “hilo caliente” que consiste en utilizar un hilo de níquel cromo calentado mediante el flujo de electricidad para cortar las piezas de foam, dado que los objetos calientes deshacen con gran facilidad este tipo de foam.

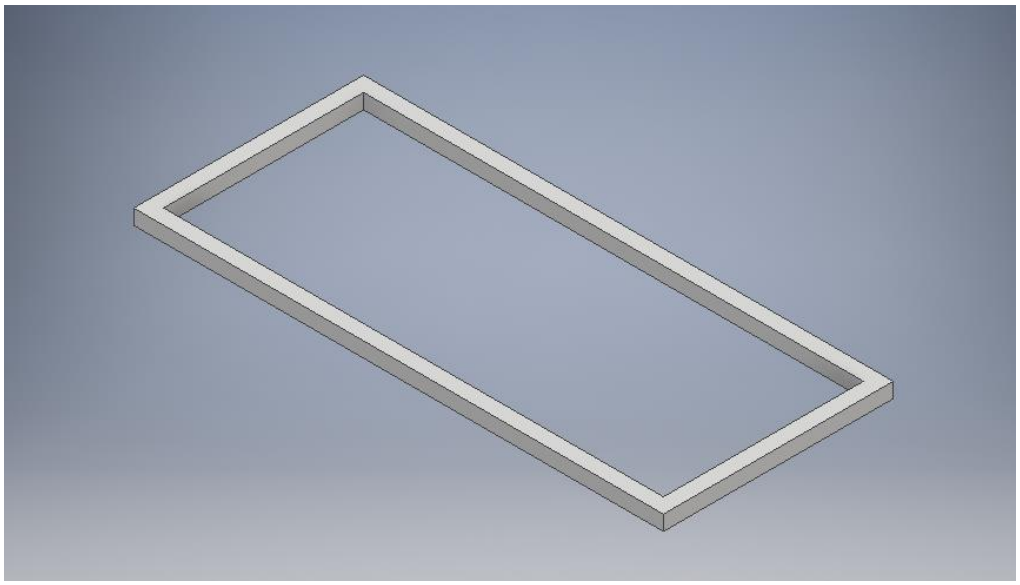


69: Zonas a recortar

En la foto no se aprecia el sistema de sujeción del ala dado que para recortar las zonas traseras ha tenido que ser extraído.

Una vez hemos recortado las zonas necesitamos una manera de acceder al compartimento de la batería, dado que una vez encolemos juntas las dos mitades del fuselaje ya no existirá ninguna manera fácil de extraer la batería. Para ello diseñaremos una pequeña puerta en el lateral del avión de manera que mediante unas bisagras nos permita abrir y cerrar el compartimento y mediante un tornillo permanezca cerrada. El conjunto de la puerta de la batería constara de las siguientes partes:

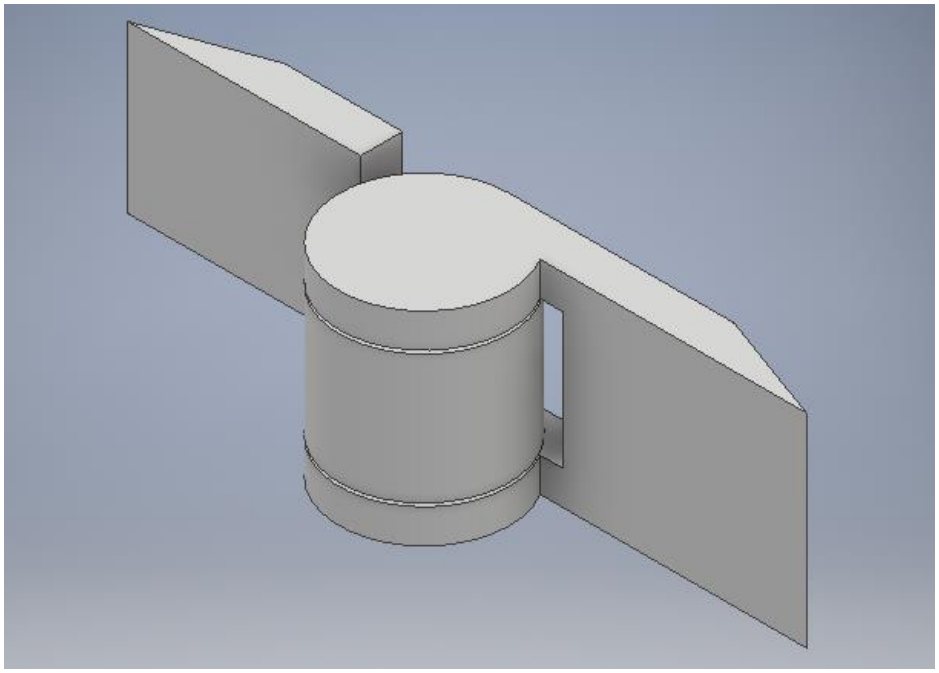
- Marco y refuerzo de la compuerta



70:Modelo 3D del marco de la compuerta

Esta pieza hará la función de guía para el corte de la compuerta y de refuerzo estructural del fuselaje

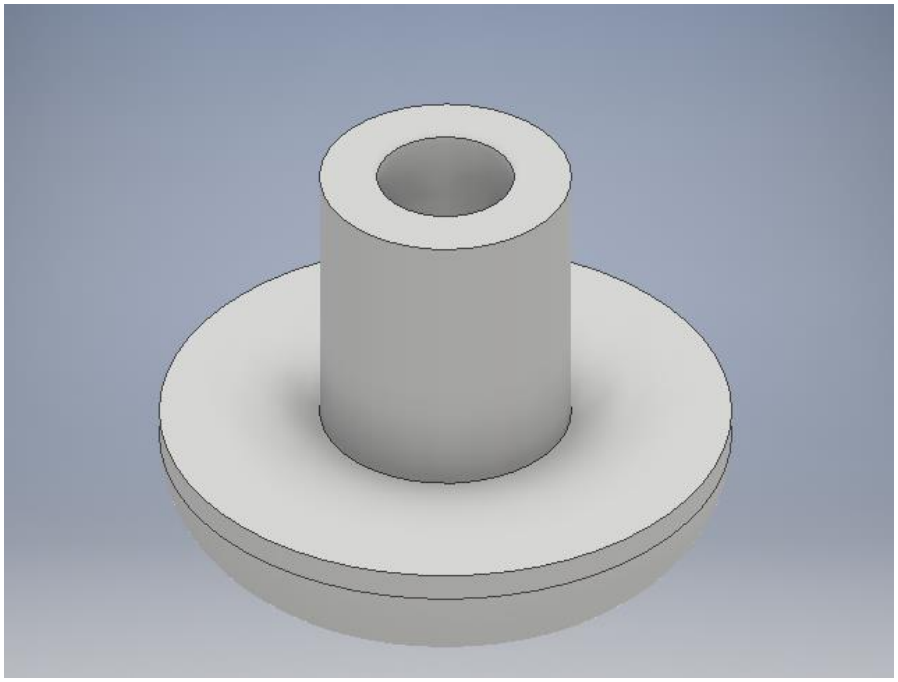
- Bisagras de la compuerta



71:Bisagras de la compuerta

Esta pieza permitirá que la compuerta se abra y se cierre. Está diseñada para ser construida de una sola pieza mediante impresión 3D, de manera que se ahorrara complejidad y peso en la misma.

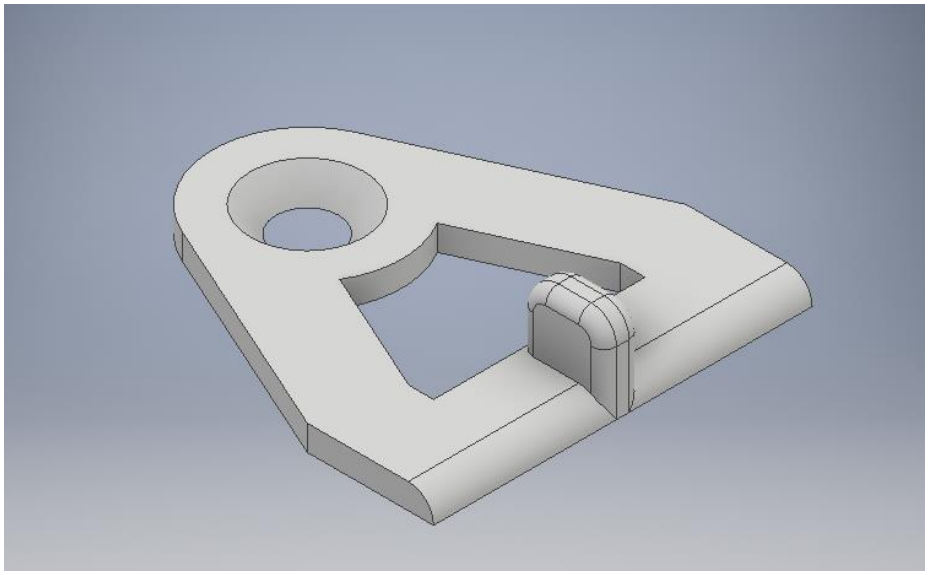
- Conjunto de rosca



72: Conjunto rosca

Esta pieza albergará una tuerca en su interior que permitirá el cierre de la compuerta

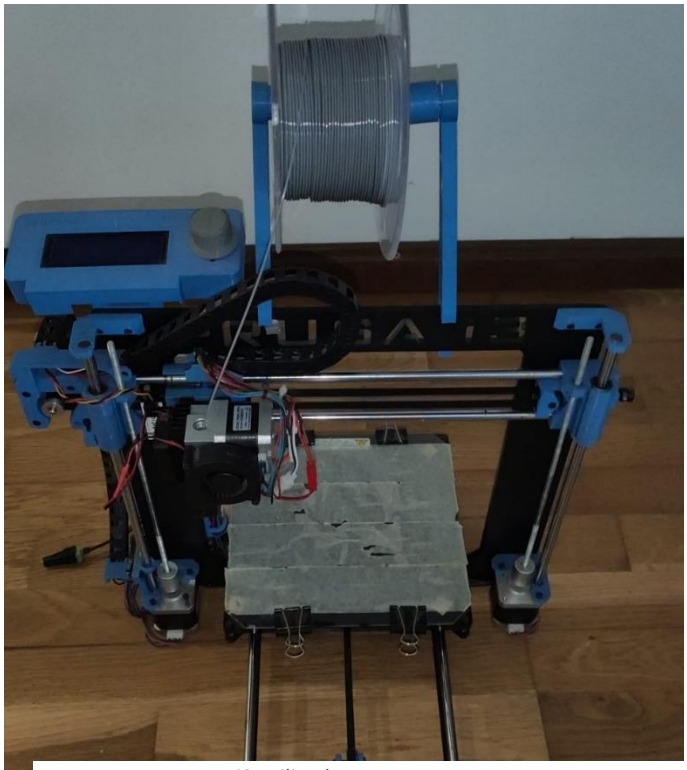
- Cierre de la compuerta



73: Cierre compuerta

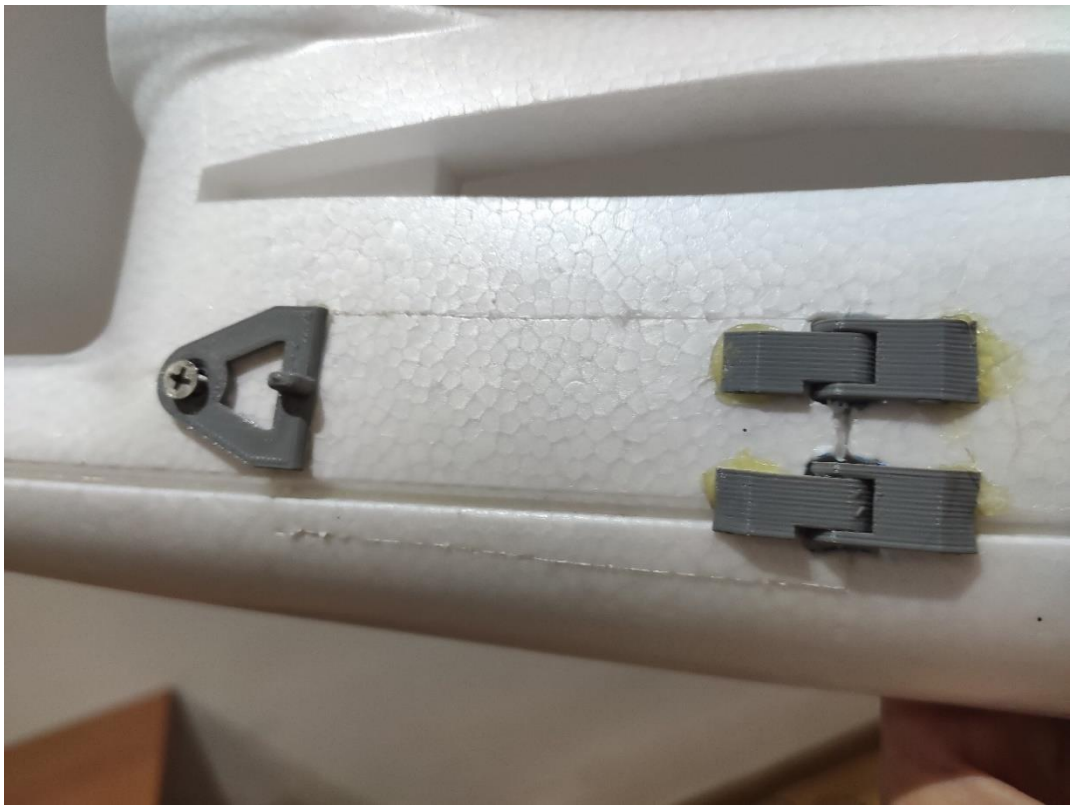
Esta pieza se unirá mediante un tornillo a la pieza “conjunto rosco” y unirá la compuerta al fuselaje.

Todas las piezas han sido diseñadas para que sean lo más aerodinámicas posibles y producidas mediante una impresora 3D de tipo FDM. En concreto una Prusa i3



74: Impresora Prusa i3 utilizada

Después de realizar los cortes en el fuselaje, encolar las partes y ajustar el tornillo el resultado ha sido el siguiente:



75.Compuerta de la batería finalizada

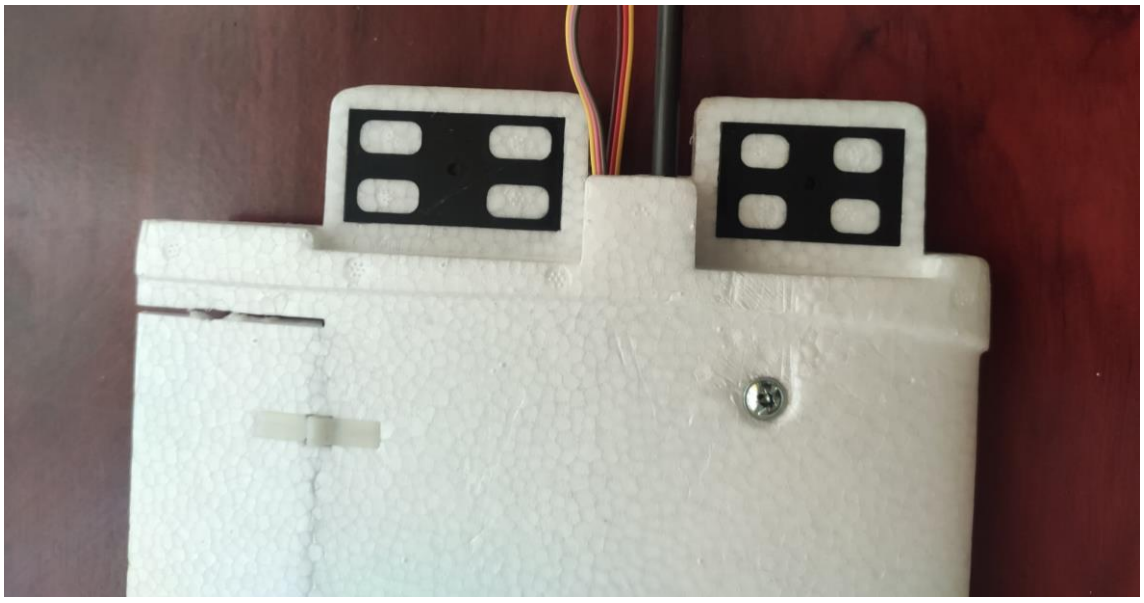
Por último, hemos hecho los agujeros para poder sacar las antenas de telemetría y video fuera del fuselaje para asegurar su buen funcionamiento. en el equipo de

76: Agujeros en el fuselaje con las antenas instaladas

telemetría hemos tenido que utilizar un cable extensor de la antena para que la mima pudiese ubicarse en el exterior de la aeronave

6.3.2 Sistema de sujeción de las alas

Originalmente la aeronave utiliza un sistema de tubos y tornillos que atraviesan el fuselaje uniendo las dos alas en su intersección a través de unas piezas de plástico embutidas en el foam del ala.



77: Zona de anclaje de las alas

Como podemos observar esta unión se realiza en una zona delicada. La zona del principio del ala es la parte donde se concentran todas las cargas del avión en vuelo. Esto lo hace un punto débil. La unión con tornillos es extremadamente rígida y cuando las alas sufren flexión a lo largo del vuelo se pueden producir pequeñas roturas al, la unión, no ser capaz de dar la suficiente libertad de flexión. Además, los canales que atraviesan el fuselaje para permitir la inserción de los tornillos quitan espacio vital y añaden peso y complejidad innecesaria.

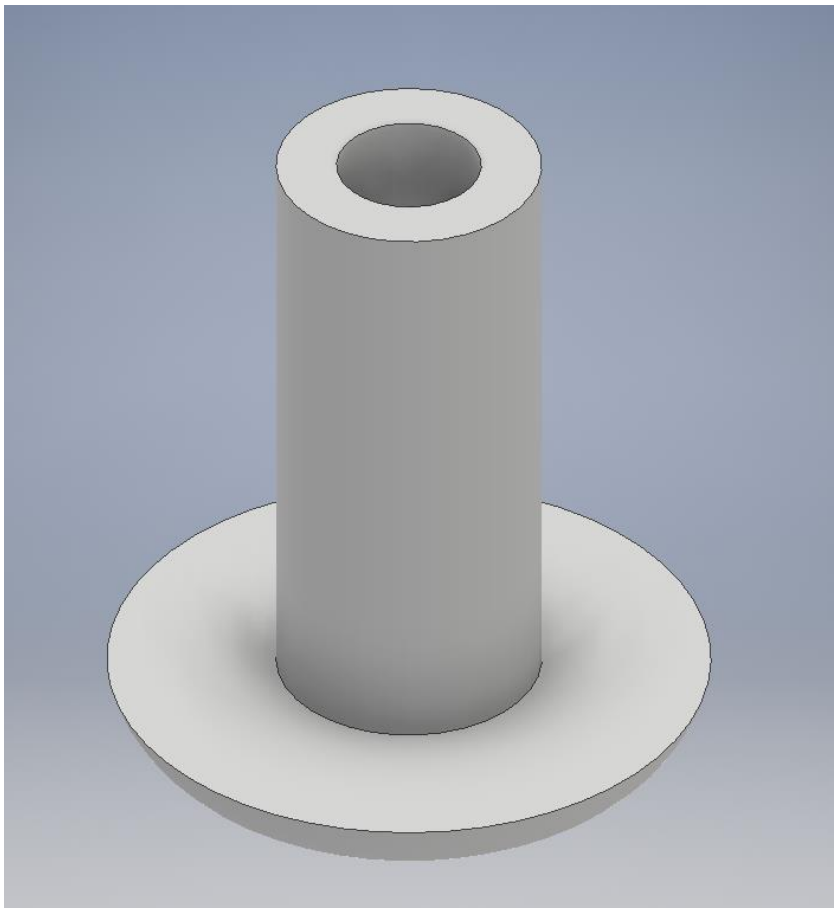
78:Unión del ala y el fuselaje

Aprovechando que el sistema de unión del ala y el fuselaje son los que transfieren los esfuerzos entre el ala y el fuselaje y que cuentan con una geometría que no permite la traslación horizontal del sistema alar, vamos a diseñar un sistema de unión de las alas que sea más elástico evitando concentraciones de tensiones innecesarias y sin afectar el espacio interior del fuselaje.

La unión entre las alas se hará mediante una pieza fina de plástico de ácido poliláctico. Esta pieza es elástica y permite los movimientos de flexión a la vez que evita que las alas se separen saliendo de su receptáculo en el fuselaje.

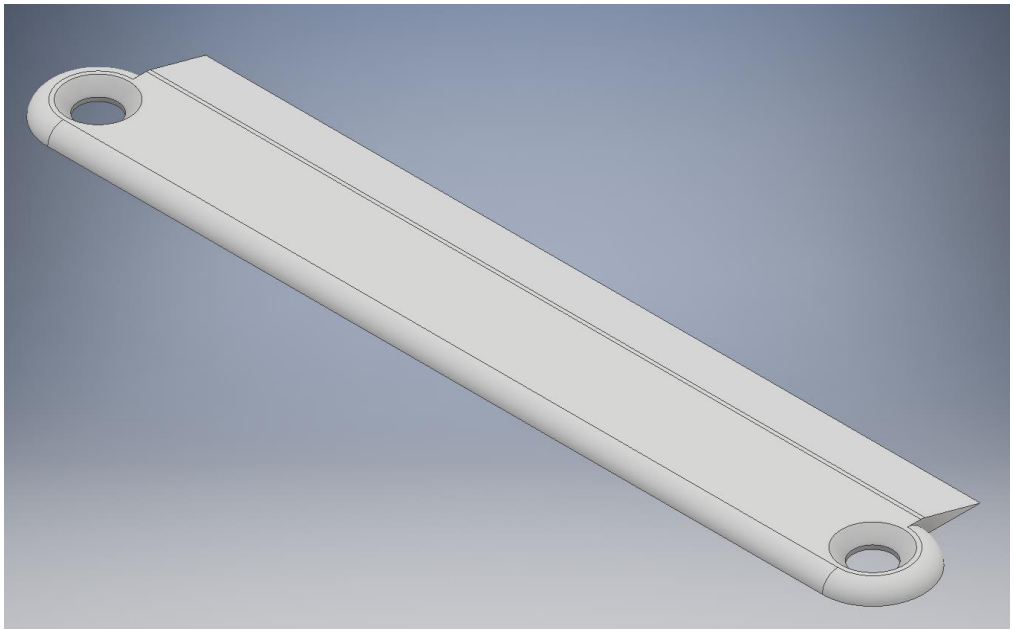
Las piezas diseñadas son las siguientes:

- Receptáculo del tornillo



79: Modelo 3D del receptáculo del tornillo

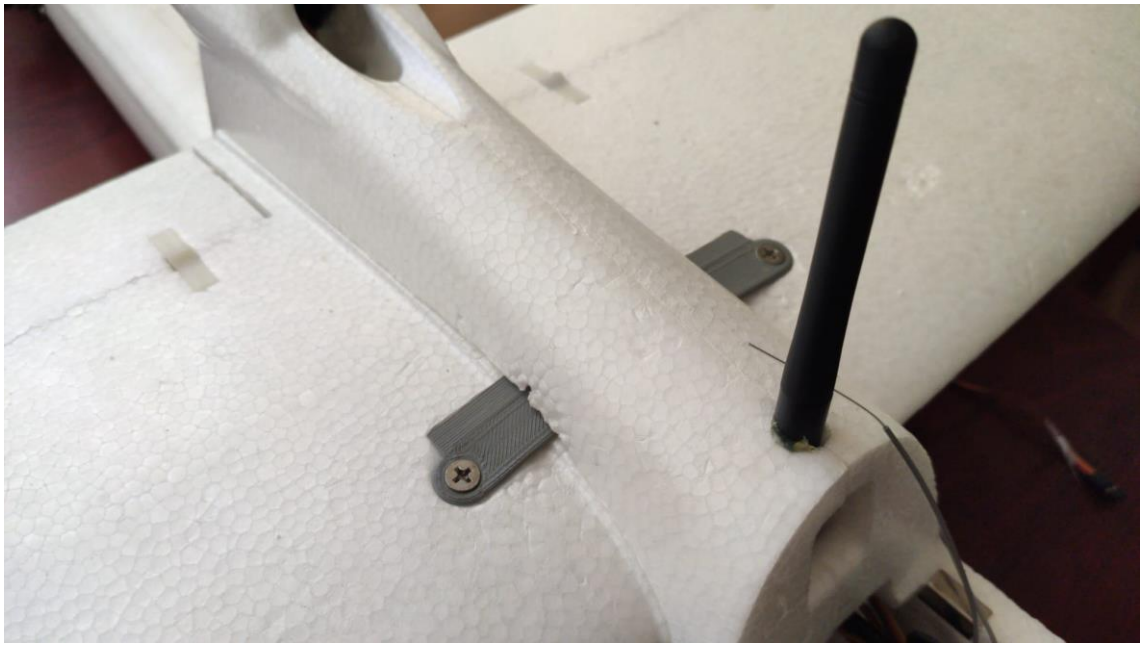
- Barra de unión



80:modelo 3D de la barra de unión

Esta última pieza al estar expuesta en la parte superior del ala cuenta con un perfil aerodinámico para reducir al máximo el rozamiento con el aire de esta.

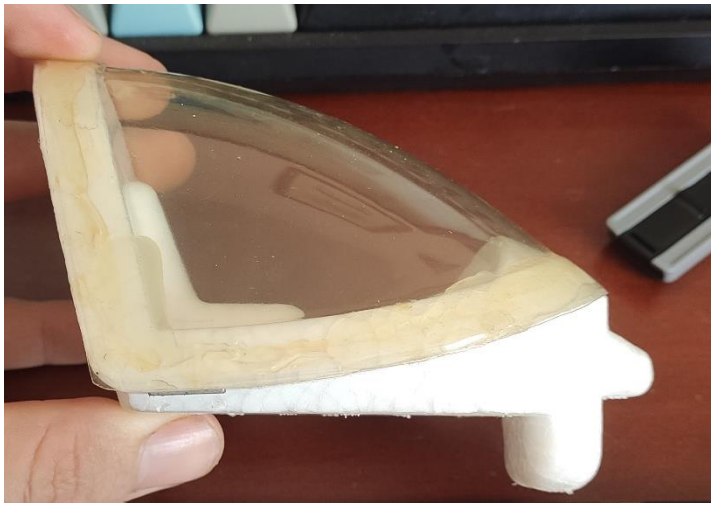
El resultado del montaje de las alas es el siguiente:



81: Alas montadas en el avión finalizado

6.3.3 Carlinga

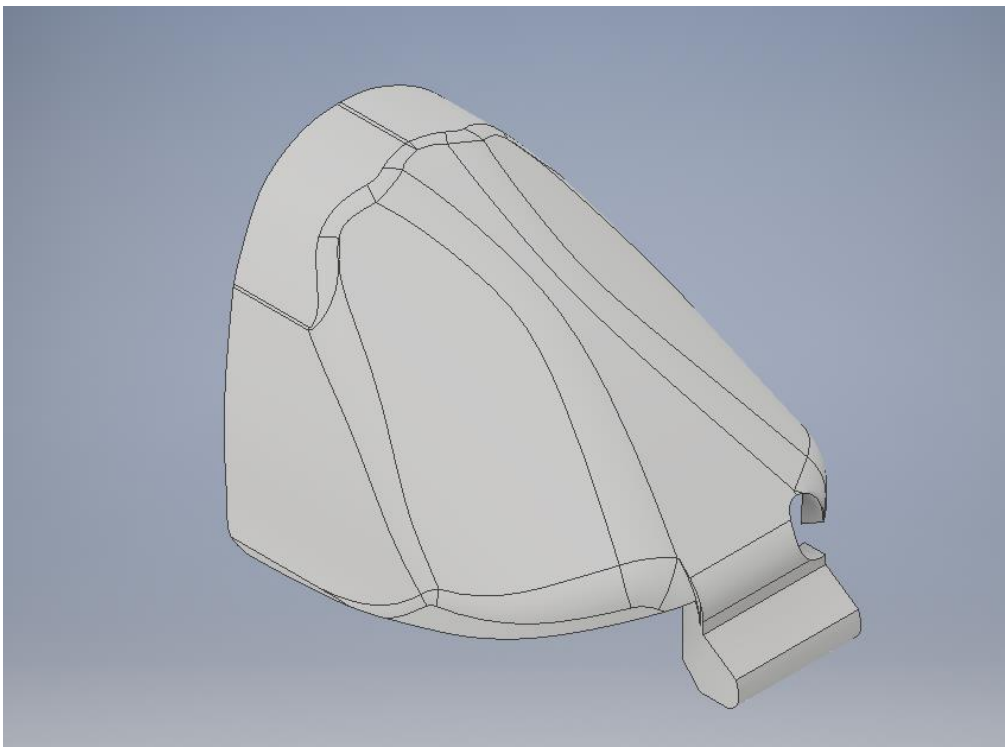
La carlinga, o espacio interior de un avión, en especial la cabina del avión donde se hallan el piloto, en nuestro caso, hipotético piloto de la aeronave. Se trata de una pieza de foam en forma de "L" que resta mucho espacio interior al ser voluminosa. Su espacio interior cumple una función estética y es un desaprovechamiento de espacio que puede ser utilizado con varias funciones. Principalmente será utilizado



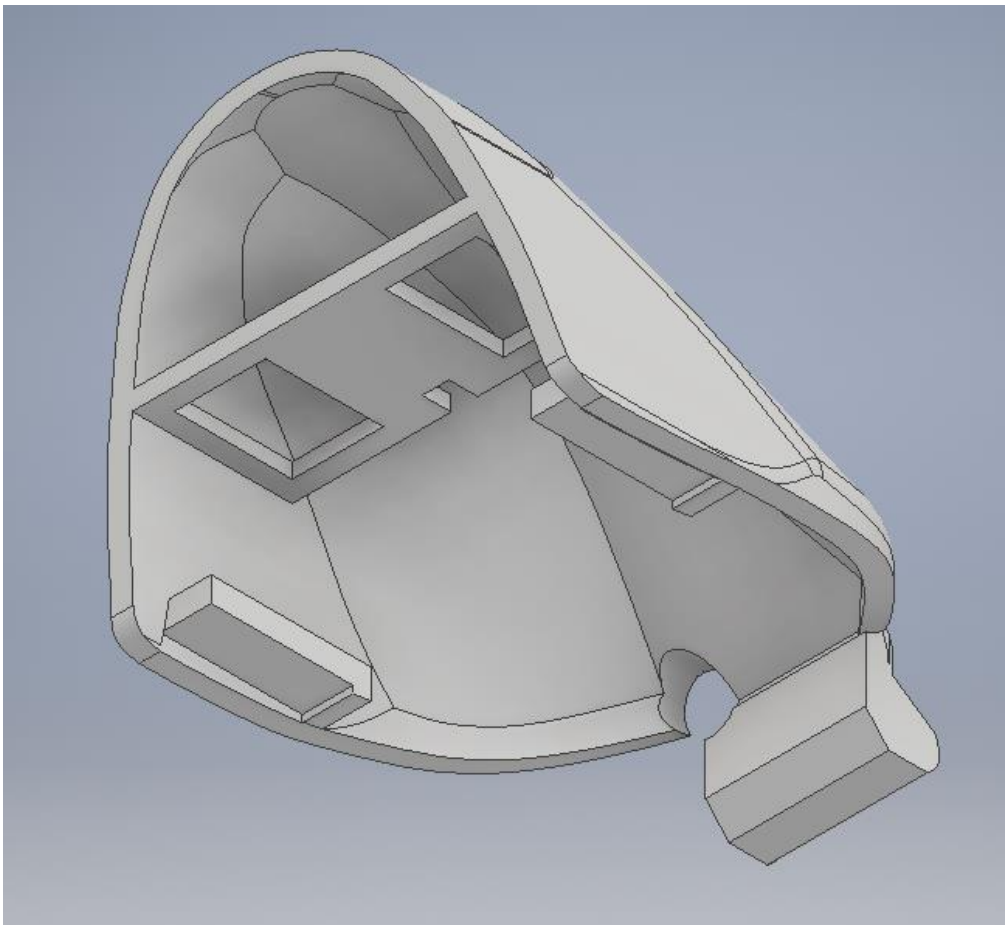
82:Carlinga original

para albergar la antena GPS de la cámara fotogramétrica.

Después de varias iteraciones se llegó al siguiente diseño:



83: Vista frontal de la nueva carlinga



84: Vista del interior de la nueva carlinga

Cuenta con una forma aerodinámica, un pasaje para la antena GPS, soporte para la antena GPS de la cámara fotogramétrica y un sistema de anclaje magnético que permite el fácil acceso.

Tras la impresión 3D y el montaje el resultado es el siguiente:

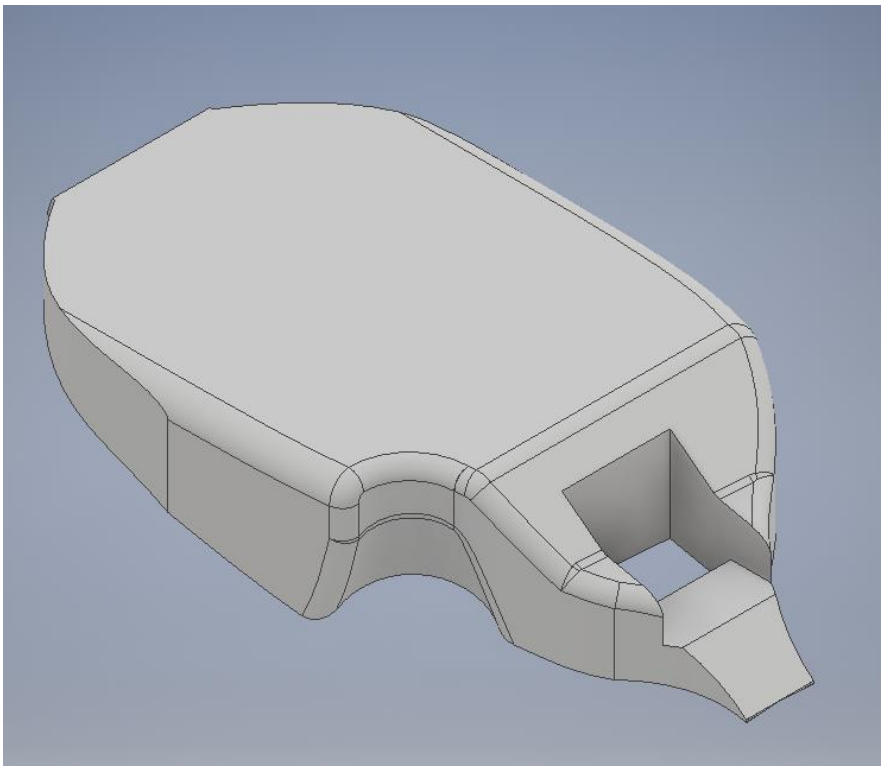
85: Carlinga diseñada montada en el avión

6.3.4 Soporte antena GPS y cámara.

Dado que colocaremos la antena GPS y cámara FPV en el morro del avión, el morro tiene una inclinación negativa y los dos componentes requieren estar paralelos al plano de la aeronave, hemos de diseñar una montura que fije los dos componentes.

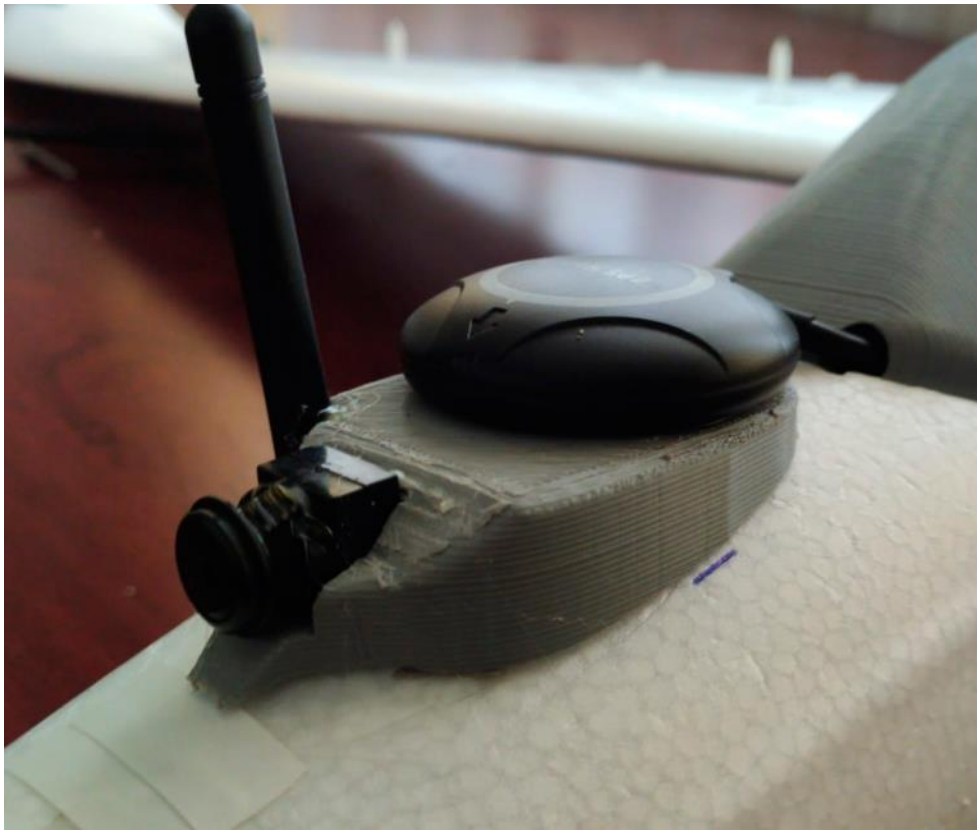
La pieza tiene que adaptarse al fuselaje, soportar la antena de video y ser lo más aerodinámica posible, al estar en una zona del avión expuesta a velocidades de viento elevadas.

El diseño final es el siguiente:



86: Soporte GPS y cámara FPV

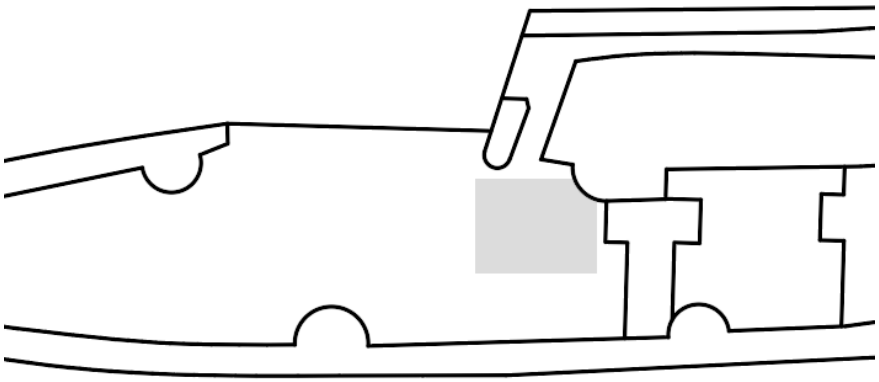
Una vez montado el soporte en el avión mediante cinta de doble cara 3M VHB:



87: Soporte montado en el avión

6.3.5 Servomotores.

Los servomotores en la configuración inicial se ubican dentro del fuselaje. En las zonas marcadas en color gris. Los brazos actuadores de los servomotores sobresalen en unos agujeros del fuselaje y actúan largas varillas de control ubicadas en el lateral del fuselaje. Esto supone varios problemas; El acceso para el mantenimiento de los servomotores y su remplazo en el caso que se vean dañados es difícil. Además, no cuentan con ningún sistema de sujeción, por lo tanto, los servomotores han de estar enganchados con cola o cinta de doble cara al fuselaje.



88: Posición estándar de los servomotores

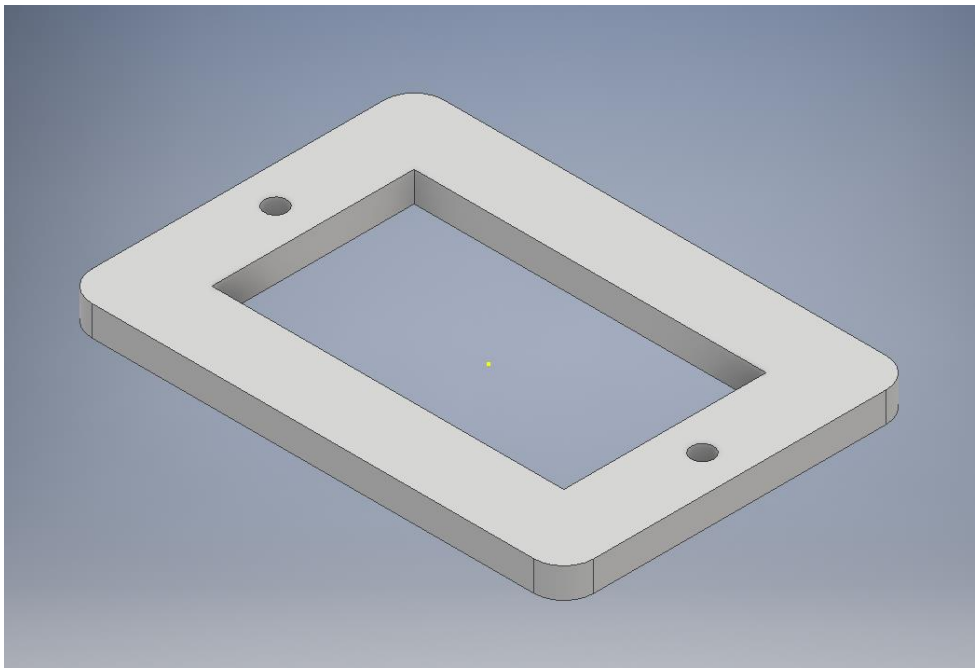
Las varillas de control tienen la tendencia a desengancharse del fuselaje y por lo tanto suponen un riesgo de pérdida de control del aparato.

Por último, su posición limita el espacio donde instalar equipos, en este caso la cámara fotogramétrica.

Por lo tanto, los reubicaremos en la cola de la aeronave, donde podrán actuar las superficies de control de una forma más directa; Contaran también con tornillos de sujeción que facilitaran en gran medida su mantenimiento y reemplazo.

Para ello diseñaremos unas piezas que irán encoladas al fuselaje que contarán con agujeros donde atornillar los tornillos de los servomotores.

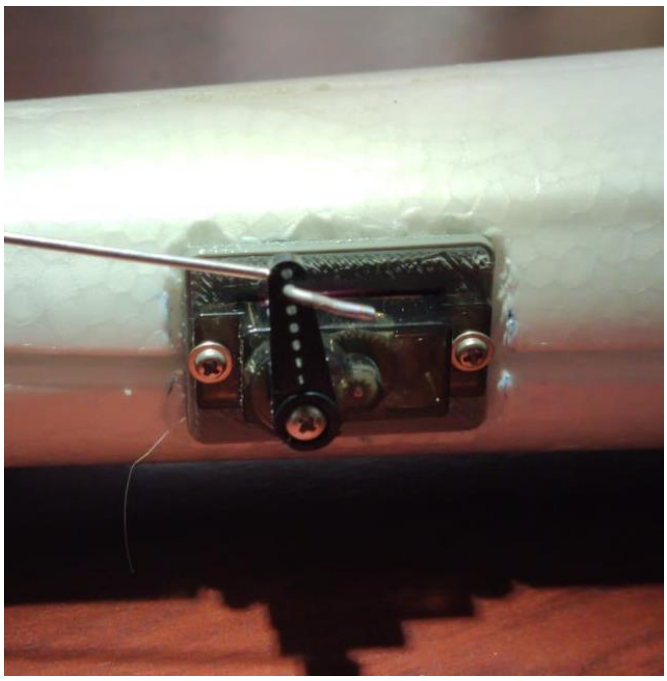
La pieza diseñada es la siguiente:



89:Modelo 3D del soporte del servomotor

Esta pieza además generara un refuerzo en las zonas que creemos un agujero para el servomotor.

Después de cortar el fuselaje, encolar la pieza y montar el servomotor el resultado es el siguiente:



90: Servomotor ya instalado

Las barras de control se han fabricado con cable de acero doblado a la longitud requerida.

6.4 FINALIZACIÓN DE LA AERONAVE

El fuselaje de la aeronave está dividido en dos mitades. A estas mitades se le añade un soporte para el motor y una barra de fibra de carbono de refuerzo en las alas. Las dos partes se unen mediante un adhesivo. El conjunto de timón de profundidad y timón de dirección se adhieren después de haber encolado el fuselaje. Por ultimo las alas tienen un canal donde se ubican el alma alar y los cables de los servomotores alares que requiere que se encole una tapa longitudinal. Dado que el fuselaje de un avión ha de poder flexionar durante el vuelo, el cianoacrilato queda descartado; utilizaremos un adhesivo de impacto. Después de probar varias marcas, la que tiene mayor resistencia es el adhesivo “ContactCeys” de la empresa “Ceys”.

91:Dos partes del fuselaje antes de ser unidas

Antes de unir las dos partes se colocaron todos los componentes en su sitio para cerciorar que no existan conflictos de espacios y que todos los componentes puedan ser remplazados y desmontados. Una vez realizada esta comprobación empezamos a pasar todos los cables y conectarlos según los esquemas presentados anteriormente. Los cables se han unido en haces mediante cinta para mantener el interior ordenado y con fácil acceso. Una vez satisfactoriamente cableado, las dos mitades se unieron insertando todos los componentes necesarios en el fuselaje (soporte motor, refuerzo de cola, conjunto de cola etc.)

A las alas se le montaron los servomotores mediante cinta de doble cara 3M VHB y se encoló la tapa rectangular.

Una vez todos los componentes unidos con adhesivo hubieron tenido al menos 12h de curación, se procedió a probar que todos los sistemas funcionaran tal como funcionaban antes de ser introducidos dentro de la aeronave. Comprobando que ninguna conexión se había hecho de forma errónea.

El resultado del avión finalizado es el siguiente:

92: Fotografías del avión finalizado listo para el primer vuelo

Peso final: 1165 g, este peso corresponde al peso de los componentes junto el fuselaje adhesivo y todos los componentes que han tenido que ser utilizados para el montaje y

funcionamiento de la aeronave. Realizaremos otra vez el cálculo de la carga alar para confirmar que no superamos el peso máximo de despegue

Carga Alar	51,480 g/dm^2
% carga	85,80%
Superfície Alar	22,63 dm^2
MTOW	1357,8 g
Peso extra possible	192,8 g

Como podemos ver aún no superamos el peso máximo de despegue, por lo que la aeronave no debería tener ningún problema en volar de forma correcta.

6.5 El nombre: ANTA

El nombre del avión (ANTA) es una combinación de ANT (aeronave no tripulada) y la letra A. La letra A tiene varios significados;

- Autónoma, al liberar el piloto de muchas de las tareas de pilotaje
- Ágil, al poder alcanzar elevadas velocidades
- Aerodinámica, al ser su diseño centrado en disminuir el máximo el rozamiento con el aire
- Alcance, uno de los objetivos principales de esta aeronave es proporcionar un alcance superior a la de cuadricópteros existentes.
- La letra A es la primera letra del alfabeto, tal como esta aeronave es la primera iteración de aeronaves de este tipo

7 Pruebas de vuelo del avión ANTA

7.1 Consideraciones previas

Por muchas comprobaciones previas que hagamos, siempre existirá el riesgo de que una aeronave no probada sufra algún problema en cualquiera de sus componentes y sufra una colisión. Todo y que la construcción de esta aeronave hace que en caso de una colisión sea extremadamente improbable que pueda herir a una persona o dañar una propiedad. Además, la posición de la batería evitaría en caso de una colisión que la misma sufriera una ruptura haciendo un fuego en el avión muy improbable.

Todo y eso los primeros vuelos los realizaremos cumpliendo la normativa y en un lugar donde en caso de un problema el riesgo de dañar cualquier propiedad o que alguien sufra alguna herida sea lo mínimo posible. También ha de tener una topografía interesante por tal de poder realizar el DEM y comprobar los resultados.

7.2 Sitio de vuelo

Después de considerar varios sitios, un sitio destaca por lo que se ajusta a nuestras necesidades. Se trata de un valle ubicado en Arcalís en Ordino, Andorra.

93: Zona de Arcalís donde realizaremos los vuelos.

Se trata de un valle ubicado a más de 6 km de una zona urbanizada (El Serrat); con un tráfico de personas extremadamente limitado, con espacio suficiente como para tener posibilidades de evitar una colisión en caso de fallo de la aeronave, con una orografía interesante, con visión absoluta del avión en todo momento, libre de vegetación evitando así posibles colisiones con árboles, húmedo reduciendo el riesgo de incendio y, lo más importante, al estar rodeado de montañas en todas direcciones, en caso de que suframos una pérdida total del control del aparato no sería posible que fuese hacia ningún otro lado. Cualquiera de las direcciones que puede tomar acaban colisionando con la ladera de la montaña. Si se da el último caso la orografía permite la recuperación de los restos del aparato de una manera relativamente fácil.

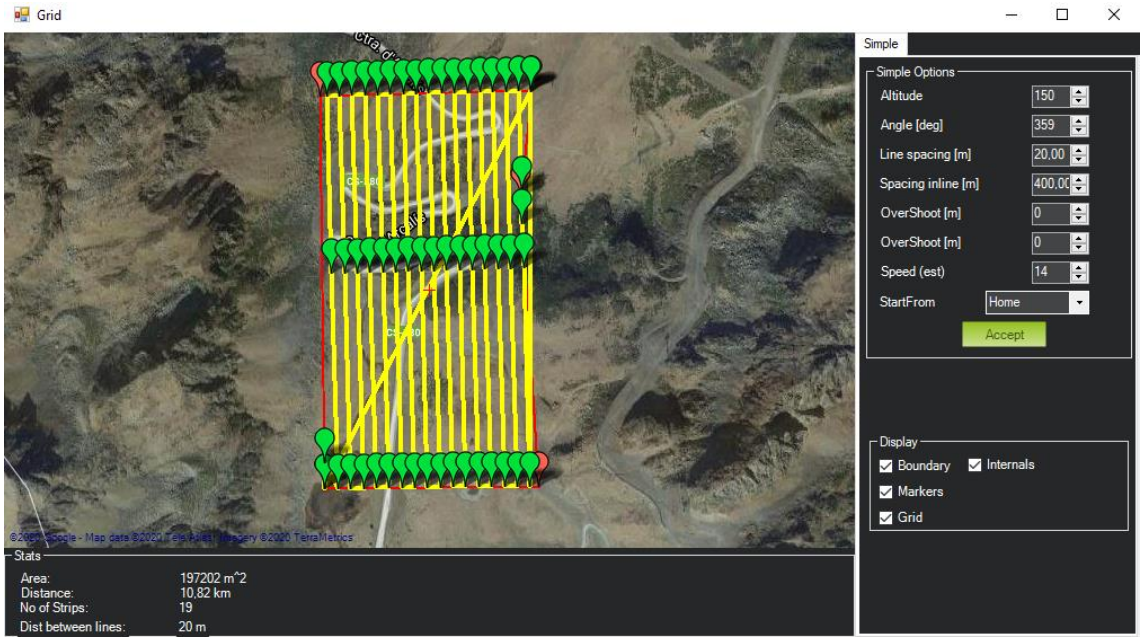
7.3 PLANIFICACIÓN DEL VUELO

El objetivo del vuelo es realizar un DEM de una zona concreta del valle de Arcalís. En concreto sobrevolaremos y tipografiaremos la siguiente zona:

94: Zona en la que realizaremos la fotogrametría

Para ello generaremos un plan de vuelo donde realizaremos rectas consecutivas y paralelas a una distancia entre ellas de 20 m hasta cubrir toda la superficie a fotografiar. En total obtenemos 19 rectas y una distancia a recorrer de 10,82 Km; esta distancia tendría que estar dentro del alcance de la aeronave; de lo contrario no habremos cumplido uno de los objetivos de la aeronave. El resultado del plan de vuelo

generado es el siguiente:



95:Plan de vuelo generado

Una vez realizado este vuelo añadimos la orden de volver a casa para que el avión vuelva al punto de inicio.

7.4 REALIZACIÓN DEL VUELO.

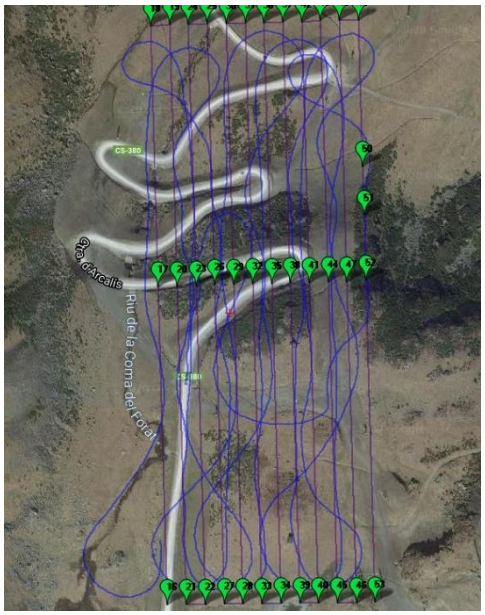
El vuelo se realizó con un viento moderado-intenso sin rachas. Tras seguir el procedimiento de arranque de la aeronave la aeronave fue despegada de forma manual y después de ganar cierta altitud se puso en modo automático. La aeronave realizo la misión al completo mostrando una gran estabilidad de vuelo en vuelo automático. Una vez finalizada la misión el avión fue aterrizado manualmente. La duración del vuelo fue de 9 minutos y 47 segundos.

96:Despegue de la aeronave mediante lanzamiento manual

En el vuelo se apreció una significante falta de empuje.
Esto es debido a la altitud de 3000m en la cual se realizó el vuelo; la densidad del aire con la altitud es menor y, por lo tanto, la eficiencia de la hélice se ve reducida

7.5 ANÁLISIS POST-VUELO

Una vez de vuelta en el despacho descargamos los datos de vuelo del avión junto a los videos fotogramétricos capturados por la cámara de este.

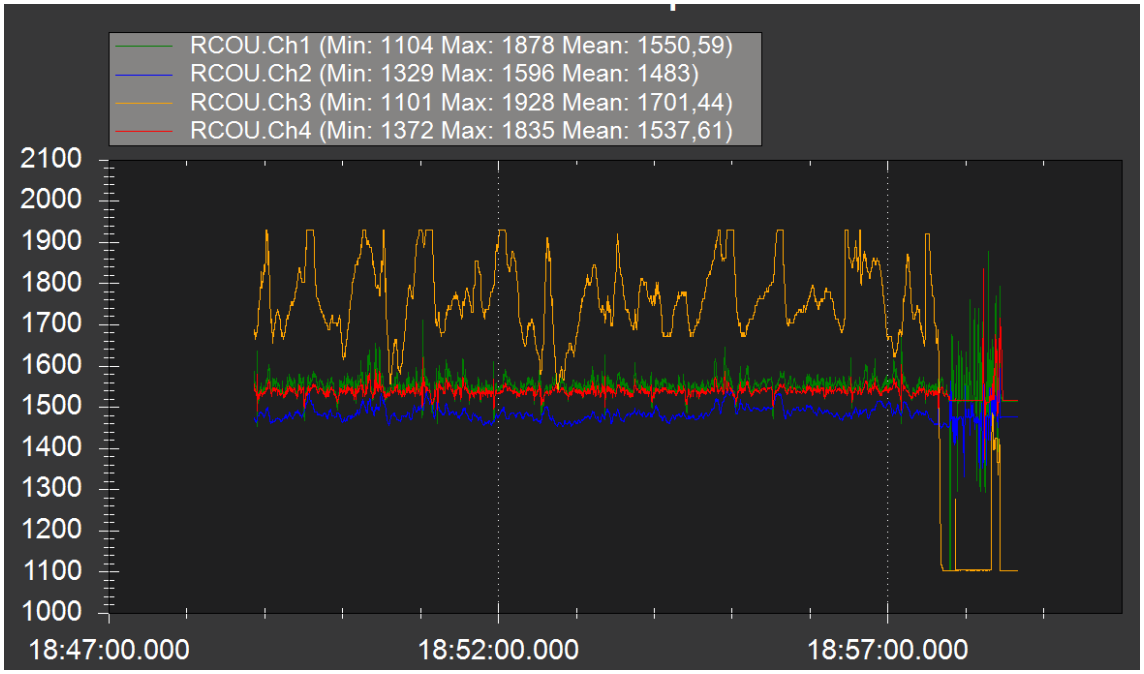


97:Vuelo realizado sobre el mapa

Tras analizar las salidas de control del aparato, hemos observado un muy buen comportamiento de las superficies de control. Las cuales han realizado correcciones menores a lo largo de todo el vuelo sin ningún pico ni ningún comportamiento oscilatorio.

En el grafico 99 podemos observar las diferentes salidas de control. Alerones en color verde, timón de profundidad en color azul, motor en color amarillo y timón de dirección en color rojo.

Si observamos el grafico podemos observar las salidas de control sin muchos picos y con un comportamiento regular. También podemos observar que el motor ha tenido un gas excesivo a lo largo del vuelo. Esto se debe a que se ha forzado a la aeronave a intentar mantener una velocidad excesiva. Esto ha reducido gravemente la autonomía de la aeronave y su eficiencia (% gas promedio = 75%). En los siguientes vuelos no forzaremos una velocidad tan elevada.



98: Salidas de control

El vuelo ha cubierto 10 km, volando a una velocidad promedio de 64.21 km/h, y adquiriendo una velocidad máxima de 80.28 km/h.

7.6 DEM DE ARCALÍS

Introducimos el video obtenido con la aeronave en Agisoft Metashape. La exportación y conversión del video a fotos se realizó sin ningún problema. Una vez tenemos el DEM lo convertimos en un raster para ser post-procesado en QGIS.

El resultado obtenido es el siguiente:

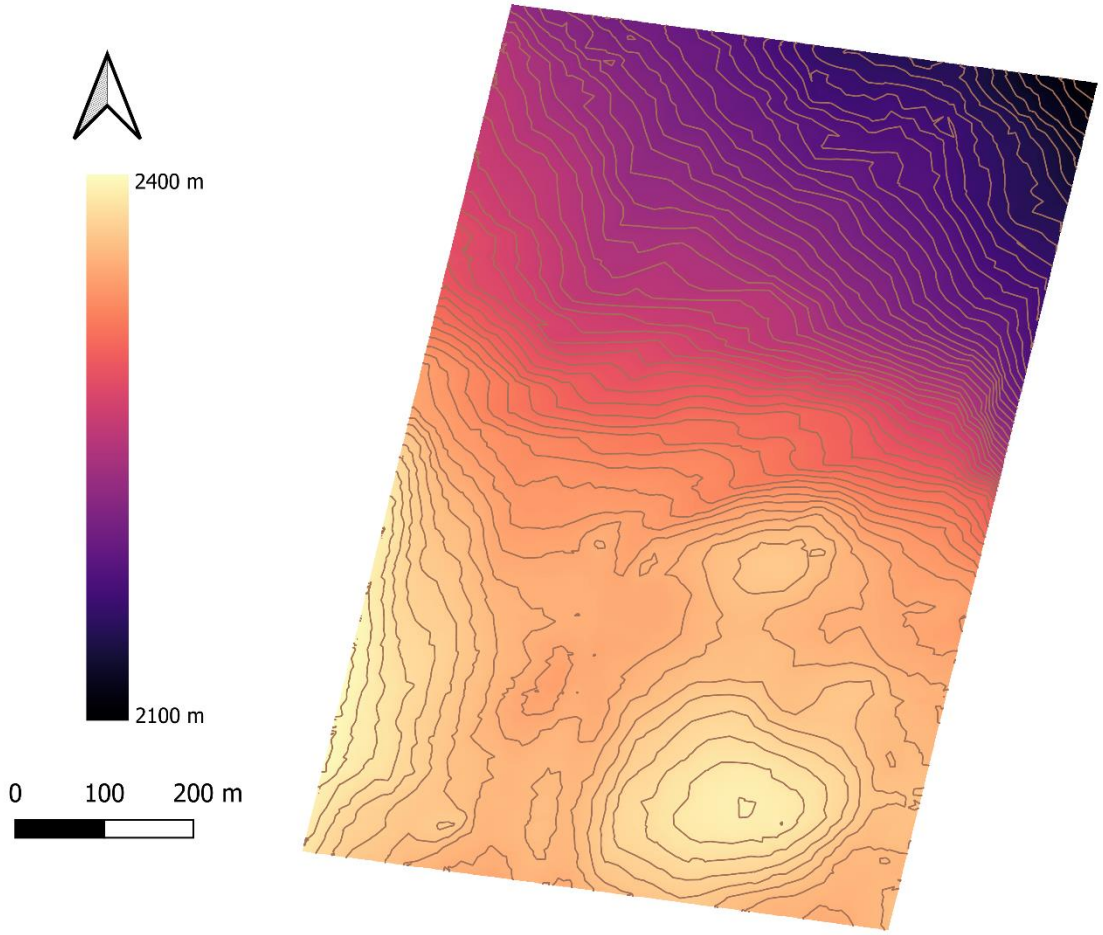


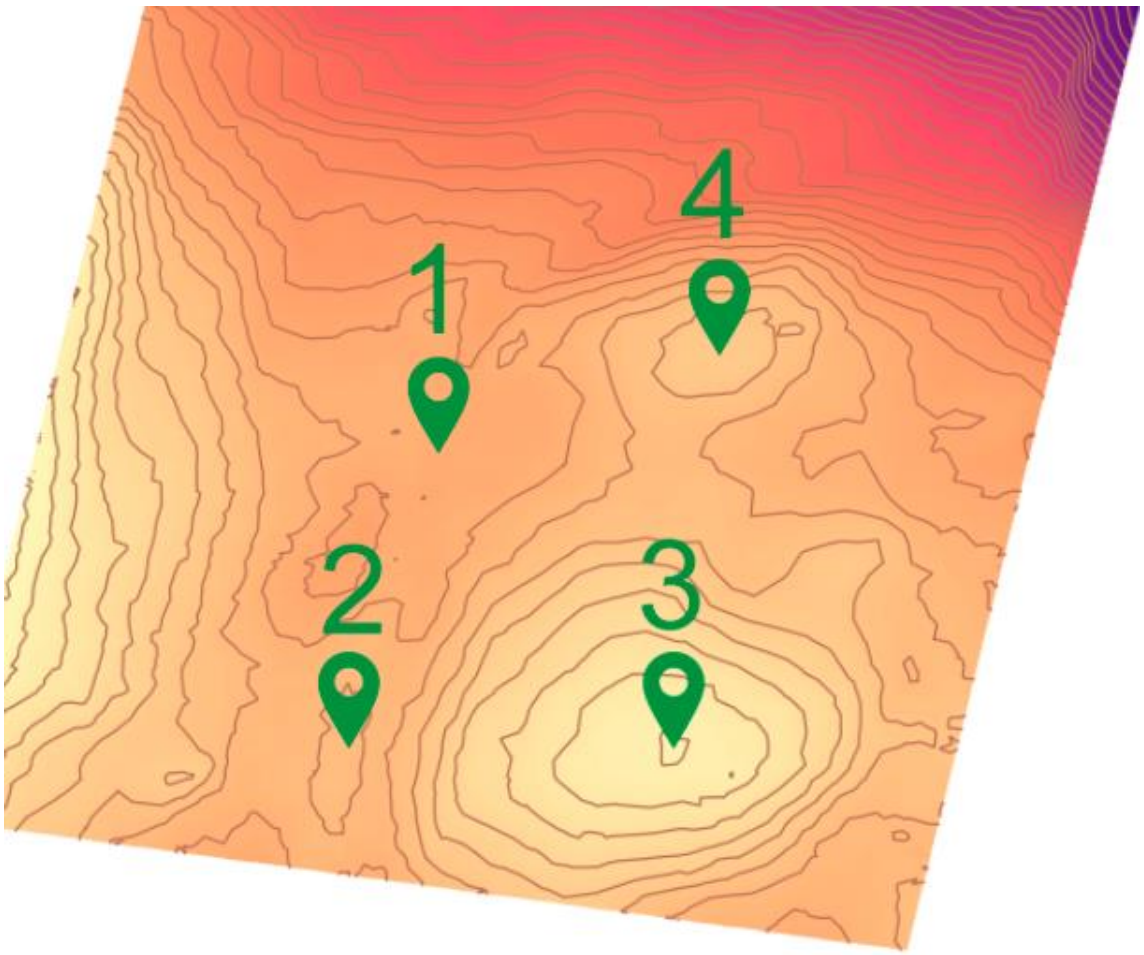
Ilustración 99: DEM de la Zona de Arcalís

7.7 COMPROBACIÓN DE LA PRECISIÓN DEL DEM GENERADO

Con la finalidad de comprobar y demostrar la fidelidad del DEM obtenido con la aeronave realizaremos un trabajo de campo en Arcalís con el objetivo de obtener la cota absoluta de ciertos puntos para después contrastarlos con los puntos obtenidos

en el DEM. Para ello utilizaremos una antena GPS similar a la presente en la aeronave conectada a una placa Ardupilot.

Los puntos que ensayaremos son los siguientes:



100: Puntos a ser estudiados

Los puntos han sido escogidos en ubicaciones con acceso posible (dado que el terreno en ciertos lugares es altamente accidentado) y en puntos planos (para evitar que la desviación horizontal afecte a la medida).

Las cotas y errores obtenidos son los siguientes:

	Altitud GPS	Altitud DEM	Error
1	2356 m	2356 m	0 m
2	2366 m	2366 m	0 m
3	2395 m	2395 m	0 m
4	2373 m	2373 m	0 m

Por la precisión del GPS me he visto obligado a utilizar solo una cifra significativa.

También hay que añadir que conforme nos acercamos al borde del DEM, al ser una zona con menos fotografías, se aprecia una distorsión de las cotas; esto es debido a el objetivo de ojo de pez presente en la cámara. La distorsión ha sido medida con el registro altimétrico presente en "Google Earth Pro".

Con los resultados estelares que hemos obtenido, podemos definitivamente determinar que el aparato es más que capaz de realizar un DEM que fidedigno al terreno real.

8 CONCLUSIONES

8.1 LA AERONAVE

Tras todas las pruebas y comparaciones podemos afirmar que la aeronave es un éxito a nivel técnico. Es capaz de realizar vuelo autónomo con una desteridad impecable, cumple más que suficientemente con los requisitos establecidos de alcance y velocidad y no supera el precio establecido.

	Cuadricóptero (Fimi A3)	Anta
Alcance	2.1 km	15 km (estimado) 10 km (3000m)
Tiempo de vuelo	10 minutos	40 minutos
Velocidad máxima	36 km/h	90 km/h

Con la misma cantidad de energía la aeronave es capaz de permanecer en el aire un tiempo mayor, cubrir una mayor distancia y a una velocidad mayor. Esto demuestra la hipótesis planteada en el principio del trabajo; una aeronave de ala fija es mucho más eficiente en el vuelo horizontal que una aeronave de ala rotativa.

Para cubrir la zona ensayada (Arcalís) con un cuadricóptero con la misma batería necesitaríamos más de 5 vuelos y 50 minutos de vuelo.

8.2 EL DEM

Los métodos desarrollados en este trabajo han permitido la generación de un DEM de una sorprendente precisión. Todo y esto, la cámara elegida ha sido un factor muy limitante a la hora de generar el DEM. Las lentes esféricas de tipo "ojo de pez" han resultado ser inadecuadas para su uso en técnicas fotogramétricas por culpa de la distorsión que presentan en los extremos del cuadro. Esto complica gravemente todo el proceso fotogramétrico. Además, al cubrir una mayor zona la densidad de pixeles sobre el terreno se reduce requiriendo un sensor con mayor resolución y tamaño para obtener resultados similares.

Para su uso en trabajos hidrológicos en los cuales requiera precisiones inferiores a un metro se necesitarían precisiones inferiores a un metro, con lo cual mejoras en el sistema de captura de imagen y procesado fotogramétrico serían necesarias.

El viento también ha resultado ser un problema para este avión. Todo y que el viento no afecta en gran medida la capacidad de vuelo del aparato, sí que afecta la toma de imágenes. Dado que la cámara está fija en el fuselaje, cuando se vuela en presencia de vientos moderados o fuertes la aeronave tiene tendencia a asumir inclinaciones más drásticas que dificultan la toma de imágenes.

Todo y que la precisión actual del aparato no es apta para trabajos hidrológicos serios, considero un éxito la parte fotogramétrica del avión. Dado que al ser una "prueba de concepto" y la primera iteración de un vehículo de este tipo en este rango de precio. En siguientes iteraciones se podrían resolver los problemas de precisión sin ningún tipo de problema.

Añadir también una pieza protectora de plástico en las puntas alares para evitar desperfectos en la superficie alar en el aterrizaje seria recomendable.

8.3 POSIBILIDADES DE MEJORA

En cuanto a las posibilidades de mejora de la aeronave, sería recomendable en siguientes versiones, incrementar el tamaño de la hélice o augmentar el número de motores. En vuelos a alta altitud la falta de densidad del aire afectaba gravemente el empuje del motor. En altitudes bajas el motor es más que suficiente.

Una batería de mayor capacidad aumentaría también en gran medida las capacidades del aparato. Pero si esto se realizase sería necesario augmentar el tamaño alar del vehículo y su potencia de impulsión.

En cuanto al método fotogramétrico, la cámara elegida ha resultado ser inadecuada para el proyecto. Ha requerido mucho post-procesado, densidad de vuelo y recortes en la zona a topografíar elevada. El GPS tampoco ha sido de gran ayuda dado que la cámara no anota la altitud a la que se encuentra el aparato haciendo necesario la corrección del DEM posterior para que las alturas sean correctas. Una cámara digital estándar con un programa que georreferencie las fotos mediante coordenadas obtenidas del avión sería una mejor opción para trabajos fotogramétricos.

La combinación de una cámara de mayor calidad, una mejor georreferenciación de las fotos y puntos o "dianas" en el terreno con una georreferenciación previa mejorarían en gran medida la precisión del DEM consiguiendo en teoría precisiones muy inferiores al metro.

8.4 CONCLUSIÓN

La realización de este trabajo ha sido un reto personal que ha puesto a prueba todas las habilidades que he adquirido durante mi formación profesional. La naturaleza multidisciplinar de este trabajo hace que este profundamente orgulloso del mismo. Después de casi un año de trabajos ver volar la aeronave es mágico y no puedo estar más agradecido por la suerte que he tenido en poder trabajar en algo que me apasiona desde que soy pequeño y obtener un resultado tan satisfactorio como el que he obtenido. Espero que mi trabajo haga que los profesionales del campo tengan en más estima las aeronaves de ala fija; que, en este sector, creo que están infravaloradas.

Para finalizar una pequeña cita de Sócrates:

“El hombre debe ascender del suelo. A lo más alto de la atmosfera y más allá. Esa es la única manera con la que entenderá el mundo en el que vive.”

9 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo va dedicado a mis padres, Carlos e Isabel, que desde pequeño han luchado por inculcarme valores de trabajo, constancia, superación y amor por la ingeniería. Valores sin los cuales este trabajo no se habría realizado.

A mis amigos Jordi, Guillem, Iván, Ester y todas las personas que desinteresadamente han sacrificado horas de su tiempo para ayudarme a realizar los vuelos del avión y siempre han estado a mi lado ofreciéndome su consejo y animo en los momentos más difíciles.

A mi tutor de TFG, Allen Bateman que desde el minuto cero confió ciegamente en mi proyecto y visión. Siempre ha estado cuando he venido con problemas e inconvenientes y su ilusión por este proyecto ha sido uno de los motores que me ha hecho seguirlo adelante.

Por último, agradecer a todos los profesionales de la docencia, tanto en la universidad como en el colegio, que gracias a su paciencia y amor a la enseñanza y a la técnica me han permitido llegar donde estoy.

10 BIBLIOGRAFÍA

U.S. Patent 821,393 — Flying machine — O. & W. Wright

Irving L. Kosow (1 de mayo de 1993). Máquinas eléctricas y transformadores. Pearson Educación. pp. 429-. ISBN 9789688802939.

Model Aircraft Aerodynamics. Martin Simons. ISBN-13: 978-1854862709. ISBN-10: 1854862707

Diccionario de la lengua española (23ª ED.). Real Academia Española

10.1 PÁGINAS WEB

- https://es.wikipedia.org/wiki/Aeronave
- https://disciplesofflight.com/beechcraft-58-baron/
- https://dronebotworkshop.com/how-does-a-quadcopter-work/
- https://www.azdome.hk/product-detail-29-azdome-GS63H-1.html
- https://www.nikonusa.com/en/nikon-products/product/compact-digital-cameras/coolpix-w300.html
- https://www.hansenhobbies.com/products/connectors/Connectors.pdf
- https://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry#:~:text=Photogrammetry%20is%20the%20science%20and,radiant%20imagery%20and%20other%20phenomena.
- http://www.photogrammetry.com/

- https://www.investopedia.com/articles/wealth-management/121415/economics-owning-small-plane.asp#:~:text=Many%20costs%20factor%20into%20the,for%20about%20%24125%20per%20hour.

- https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/buying-an-aircraft/tips-on-buying-used-aircraft/operating-costs-and-financing

- https://ardupilot.org/ardupilot/

- https://github.com/ArduPilot/ardupilot

- https://en.wikipedia.org/wiki/ArduPilot